

UNIVERSIDAD DEL NORTE
Departamento de Ingeniería Industrial
Maestría en Ingeniería Administrativa

DISEÑO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA DE ALTA CALIDAD

Preparado por
Alex Orozco
Andrés Blanco

Tutor
Rita Peñabaena



Barranquilla, Colombia
2018

DECLARACION DE AUTORIA ORIGINAL

"El informe del proyecto que figura en este documento no ha sido presentado previamente para optar por un título o diploma en esta o en cualquier otra institución de educación superior. Es resultado del conocimiento y creencia de los autores y no contiene ningún material publicado o escrito por otra persona excepto donde previamente se hace la debida referencia"

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	1
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	1
3. Justificación	2
4. Objetivos.....	4
4.1. Objetivo general	4
4.2. Objetivos específicos	4
5. Cronograma propuesto.	5
6. Etapas metodológicas del proyecto.	6
CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL Y TEORICO..	9
1. Marco de referencia	9
1.1. Marco Conceptual	9
1.2. Marco Teórico	17
2. Análisis bibliográfico y conclusiones.	27
CAPITULO III. DIAGNOSTICO DEL SISTEMA DE GENERACION Y DISTRIBUCION DE VAPOR.....	29
1. Etapas 1: Análisis de las tecnologías existentes en la recuperación de agua, basado en la literatura y visita industrial.	29
1.1. Revisión de artículos	29
1.2. Visita a plantas similares con sistemas de recuperación de agua.....	30
1.3. Viabilidad de la implementación la literatura estudiada y en la visita industrial realizada.	31
2. Etapas 2: Requerimientos de diseño del sistema.	32
2.1. Parámetros del proceso de generación de vapor.	32
2.2. Producción de condensado.	45
2.3. Área disponible para la instalación del sistema.....	55
3. Etapas 3: Definición de alternativas de solución.....	55
3.1. Descripción de los sistemas.	55
3.2. Criterios de selección y matriz de evaluación.....	59
3.3. Comparación ponderada	68
CAPITULO IV. VALIDACION DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE CONDENSADOS.	70
1. Etapas 4: Validación del sistema de recuperación de condensado.	70
1.1. Simulaciones	70
1.2. Ahorros asociados a la recuperación de condensado.	77
2. Impacto ambiental.....	77
2.1. Agua potable.	77
2.2. Emisiones de CO ₂	78
CAPITULO V. EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA.	79
1. Etapas 5. Evaluación técnica y financiera.	79
1.1. Evaluación técnica de la oferta.....	81
1.2. Evaluación financiera del proyecto.	83
CAPITULO VI. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN.	86

1.	Etapa 6: Recomendaciones y plan de implementación.	86
1.1.	Observaciones	86
1.2.	Recomendaciones.....	90
1.3.	Plan de implementación.	91
CONCLUSIONES.....		96
REFERENCIAS.....		97

Lista de tablas

Tabla 1. Cronograma propuesto.	5
Tabla 2. Concentraciones permitidas en las calderas. (British Standard: Treatment of water for steam boilers and water., 1997)	17
Tabla 3. Análisis bibliográfico.	31
Tabla 4. Caracterización de condensados de planta de emulsión.	47
Tabla 5. Comparación ponderada.	68
Tabla 6. Comparación obtenida por el software.	76
Tabla 7. Ahorros asociados por recuperación de condensados.	77
Tabla 8. Análisis de riesgos.	79
Tabla 9. Evaluación técnica de oferta.	81
Tabla 10. Plan de contingencias.	94
Tabla 11. Cronograma de implementación.	95

Lista de figuras

Figura 1. Ciclo ideal de generación de vapor. (Marroquín, 2013)	14
Figura 2. Ciclo de vapor real. (Marroquín, 2013).....	14
Figura 3. Caldera pirotubular.....	16
Figura 4. Proceso de recolección de condensados.....	18
Figura 5. Un purgador de vapor descargando a una línea de retorno de condensado común. (Spirax Sarco, 2017)	20
Figura 6. Purgador (García, 2017)	20
Figura 7. Desgasificador. (Spirax Sarco, 2017).....	25
Figura 8. Transferencia de calor. (Lienhard IV, 2000).....	27
Figura 9. Planta PRILLEX® AMERICA de la empresa ENAEX (Planta Prillex® América, 2016).....	30
Figura 10. Funcionario en visita a la planta PRILLEX® AMERICA (Planta Prillex® América, 2016).....	30
Figura 11. Cálculo de entalpía específica de evaporación. (Spirax Sarco, 2018).....	37
Figura 12. Esquema del sistema de generación de vapor.	42
Figura 13. Datos de generación de vapor de la planta de emulsión.	43
Figura 17. Pérdidas de vapor por fugas.	44
Figura 15. Descarga de trampa de vapor. (Issue, 2002)	48
Figura 16. Trampas de vapor instaladas actualmente.	49
Figura 20. Gráfica de capacidad de condensado. (Spirax Sarco, 2002)	50
Figura 18. Déficit de desalojo de condensado.	51
Figura 19. Tubería Instalada y Conexiones de Tubería.	52
Figura 23. Sistema de detección de condensado contaminado.	53
Figura 21. Ciclo del agua.	54
Figura 22. Espacio disponible para el sistema de recuperación de condensados.	55
Figura 23. Diseño conceptual Tanque-Bomba.	56
Figura 24. Sistema de bombeo.	56
Figura 25. Propuesta Tanque - Bomba.	57
Figura 26. Vista Isométrica propuesta uno (1) tanque-bomba.	57
Figura 27. Trampa – bomba.....	59
Figura 28. Esquema sistema Trampa-Bomba.....	59
Figura 29. Sistema de generación y distribución de vapor con recuperación de condensado.	71
Figura 30. Resultados HYSYS	72
Figura 31. Datos del modelo base sin recuperación de condensado.	73
Figura 32. Diagrama del modelo base: Sin recuperación de condensado.	74
Figura 33. Resultados modelo base: Sin recuperación de condensado.....	74
Figura 34. Sistema de generación con recuperación de condensado.....	75
Figura 35. Emisiones de Dióxido de carbono.....	78
Figura 36. Evaluación financiera con el software MODEC.....	84
Figura 37. Parámetros a medir en la caldera.	92

RESUMEN

El agua potable es el recurso natural más importante para la existencia del ser humano. Se plantea un proyecto enfocado en reducir el consumo de agua potable en la fabricación de emulsión, por medio de la optimización de los volúmenes de agua potable requeridos, para así contribuir a minimizar la huella ambiental y adicionalmente obtener ahorros representados en menores costos en insumos del proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, se propone diseñar un sistema de recuperación de agua de alta calidad, que permita reducir el consumo del recurso hídrico. Para lograr este objetivo, se identificarán las tecnologías existentes en la recuperación de agua de alta calidad, se evaluará la compatibilidad de las distintas soluciones con los requerimientos de la planta para finalmente establecer el diseño del sistema. Además, se realizará un análisis que permita validar desde el punto de vista financiero y ambiental la viabilidad de la propuesta. Por último, se definirá un plan de implementación para asegurar el éxito de la puesta en marcha del diseño.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1. Introducción

El agua potable es el recurso natural más importante para la existencia del ser humano. En el año 2005 se implementó un sistema en el cual se recuperaba el agua de alta calidad utilizada en la generación de vapor con el fin de reusarla como materia prima en la fabricación de la emulsión. Esta iniciativa no tuvo resultados positivos ya que la calidad del agua reutilizada afectaba la estabilidad del producto final (emulsión). Partiendo de estos resultados desfavorables, el presente proyecto buscará reincorporar el agua de alta calidad recuperada, al ciclo del sistema de generación de vapor y no en la fabricación de emulsión.

Se identificarán las tecnologías existentes en la recuperación de agua actualmente, así mismo se establecerán los requerimientos de diseño del sistema y posteriormente se evaluará la compatibilidad entre las distintas soluciones y los requerimientos de la planta. Además, se realizará un análisis que permita validar desde el punto de vista financiero y ambiental la viabilidad de la propuesta. Por último, se establecerá un plan para asegurar el éxito de la puesta en marcha del diseño.

2. Planteamiento del problema

El agua es considerada como el recurso natural más valioso e indispensable para la vida, por consiguiente, es un deber de todos los seres humanos preservarla y hacer un uso eficiente de la misma.

A nivel mundial, se han realizado importantes eventos como el “VII Foro Mundial del Agua” denominado “Agua para el futuro”, celebrado del 12 al 17 de abril del 2015 en la ciudad de Daegu-Gyeongbuk, República de Corea, en el cual las discusiones se centraron en las aplicaciones de las soluciones hídricas que se identificaron en el pasado encuentro, una de ellas encaminada al reúso del agua en los procesos industriales reduciendo no solo costos sino el impacto ambiental asociado a la captación del líquido vital. (Arriaga Medina, 2015) Además, entre los retos del milenio, los más importantes se refieren a la autosuficiencia en agua, en alimentos y el fomento de la educación ambiental; esto por mencionar algunos escenarios en los cuales se ha empezado a trabajar por cuidar de este elemento. (EDP University - Recinto de San Sebastian, 2017)

La mayoría de la población no es consciente de la problemática asociada al agua, por esto no se realizan las medidas suficientes y adecuadas para evitar su desperdicio. Colombia es un país que anteriormente había sido considerado rico en sus recursos hídricos por sus abundantes ríos y su ubicación geográfica privilegiada, sin embargo, existe una creciente preocupación relacionada con el acceso al precioso líquido especialmente en departamentos como La Guajira, caracterizados por ser una zona semidesértica, donde el cambio climático y los diferentes fenómenos naturales han afectado sustancialmente el acceso al agua principalmente para consumo humano.

Partiendo de la importancia del agua como líquido vital para la subsistencia humana y la preocupación por la misma en todos los ámbitos anteriormente expuestos, la presente propuesta centra su atención en el mejor uso del agua potable empleada en la fabricación del agente explosivo (emulsión) utilizado en los procesos de voladura.

El agua potable usada para la fabricación de emulsión se debe a la necesidad de generar vapor para producir el calor requerido en una parte del proceso.

Al presente, dentro del proceso de fabricación de emulsión, específicamente para la generación de vapor se consume un promedio mensual de 1000 m³ de agua potable

De acuerdo a lo anterior surge el siguiente interrogante: ¿Cómo se puede reducir el consumo de agua potable en el proceso de fabricación de emulsión?

3. Justificación

Con base a lo expresado anteriormente y conscientes de la importancia que representa en el mundo en general el uso eficiente del recurso hídrico, el presente proyecto busca reducir la cantidad de agua potable que actualmente es consumida para la fabricación de la emulsión mediante la reutilización de este preciado líquido. Para dar cumplimiento a este proyecto se trabajará desde dos puntos de vista:

- **Ambiental**, teniendo en cuenta que tiene un impacto positivo en los consumos de agua y gas natural, y a su vez logra reducir las emisiones de CO₂.

- **Financiero**, correspondiente a los ahorros en costos de insumos en la fabricación de emulsión enmarcado en los siguientes aspectos:
 - Reducción del consumo de agua potable.
 - Reducción de productos químicos usados para el tratamiento de agua potable.
 - Reducción del volumen de gas natural usado para la generación de vapor.

El volumen de agua que se espera optimizar en el proceso productivo es alrededor de 10.000 m³ de agua/año. Además, representaría una disminución en los niveles de consumo de Gas y por consiguiente en las emisiones de CO₂ que contribuyen a la reducción del impacto ambiental a la capa de ozono del planeta.

4. Objetivos.

4.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de recuperación de agua de alta calidad, **que permita reducir** el consumo del recurso hídrico.

4.2. Objetivos específicos

1. Identificar y evaluar las tecnologías existentes de acuerdo a los requerimientos de la planta con el fin de analizar las variables claves que permitan definir las especificaciones del diseño del sistema de recuperación de agua de alta calidad.
2. Establecer los requerimientos del diseño del sistema mediante la definición y análisis de los parámetros de generación de vapor para definir las alternativas de solución.
3. Analizar la alternativa de solución mediante el uso de simulaciones para validar las condiciones óptimas del sistema de recuperación de condensado propuesto.
4. Realizar un análisis que permita validar desde el punto de vista técnico, financiero y ambiental la viabilidad de la propuesta.
5. Establecer un plan de implementación que garantice el éxito de la puesta en marcha del diseño propuesto.

5. Cronograma propuesto.

En la siguiente tabla se propone un esquema de trabajo para la realización del presente proyecto.

Tabla 1. Cronograma propuesto.

Actividad	Mes					
	1: Dic/17	2	3	4	5	6: Mayo/2018
Revisión literaria						
Análisis de las tecnologías existentes en la recuperación de agua.						
Requerimientos del diseño del sistema						
Definición de alternativas de solución						
Validación del sistema de recuperación de condensado						
Evaluación de la viabilidad financiera del proyecto						
Plan de implementación						
Presentación del documento terminado						
Sustentación del proyecto						

6. Etapas metodológicas del proyecto.

Para el desarrollo del proyecto se proponen 6 etapas que se citan a continuación:

Etapas 1: Análisis de las tecnologías existentes en la recuperación de agua, basado en la literatura y visita industrial.

- Revisar artículos, páginas web, y antecedentes en la compañía relacionados con la recuperación de agua.
 - Mediante la lectura de artículos científicos relacionados con el proceso de generación de vapor y su optimización.
 - Aplicar el conocimiento adquirido a través de visitas previas a industrias existentes con tecnologías de recuperación de agua.
 - Realizar visitas a plantas similares en las que se haya implementado sistemas con el mismo fin.
- Analizar la viabilidad de la implementación de un sistema de recuperación de agua de alta calidad basado en la literatura estudiada y en la visita industrial realizada.

Etapas 2: Requerimientos de diseño del sistema.

En la presente etapa se identifican los requerimientos y limitantes del proceso de generación y distribución de vapor.

- Revisar las conclusiones de antecedentes relacionados con el proyecto anteriormente implementado en la planta para la recuperación de agua.
- Validar el funcionamiento del sistema de generación de vapor, mediante una evaluación y diagnóstico del mismo.
 - En caso de la existencia de fugas determinar las pérdidas de vapor en función de la longitud del hilo de vapor visible o en función del tamaño del orificio por el cual se produce la fuga de acuerdo a las tablas establecidas.
 - Identificar las restricciones de acuerdo a los parámetros actuales del proceso de fabricación de emulsión (Presión y temperatura).
- Determinar las especificaciones del sistema de recuperación de agua basado en las características de la planta, para ello se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- Calcular la cantidad de gas necesario para la producción de vapor promedio
- Caracterizar el agua que se planea reutilizar para comprobar que se encuentre dentro de los parámetros establecidos por la *Norma BS 2486: Tratamiento de agua para sistemas de vapor*.
- Establecer el ciclo de vida del agua con el objetivo de definir la cantidad máxima de veces a reutilizar en el proceso teniendo en cuenta que debe ser de una calidad óptima para evitar daños en las calderas.
- Requerimientos de sistema de drenado de condensado.
- Identificar el área disponible para la instalación del sistema de recuperación de condensado.

Etapas 3: Definición de alternativas de solución.

- Identificar los criterios de selección de la alternativa de solución tales como un componente técnico, ambiental, económico, confiabilidad y tiempo de implementación.
- Establecer mediante una matriz de evaluación, incluyendo los criterios identificados en el paso anterior, a la luz de los requerimientos de diseño del sistema teniendo en cuenta las ventajas y desventajas de cada una de las alternativas de solución para la recuperación de agua.
- Con base a la matriz de evaluación escoger la mejor alternativa de solución para el diseño.

Etapas 4: Validación del sistema de recuperación de condensado.

- Con la ayuda del programa Aspen Hysys y Steam System Tool se realiza la simulación del sistema actual acoplado a la recuperación de condensado.
 - Asegurar la compatibilidad entre las necesidades de la planta y el sistema de recuperación a implementar.
 - Determinar el costo del sistema basado en los precios ofrecidos por los proveedores escogidos, mano de obra, entre otros recursos.

Etapas 5: Evaluación de la viabilidad financiera del proyecto.

- Establecer los ahorros relacionados con la disminución en el consumo de gas, agua potable, y químicos asociado a la reutilización del agua.

- Determinar la inversión necesaria en maquinaria, personal y herramientas para llevar a cabo la instalación del sistema de recuperación de agua en la planta actual.
- Con base a los valores históricos de consumo de agua potable de la planta proyectar la reducción de la captación de agua de los acuíferos, los ahorros mensuales de agua potable debido a la implementación del sistema para establecer el impacto ambiental del proyecto.
- Así mismo estimar los ahorros por disminución en el consumo de gas natural.
- En esta etapa se espera establecer el tiempo necesario para la recuperación de la inversión con base a los ahorros presupuestados y por medio del cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) evaluar la viabilidad del proyecto.

Etapas 6: Plan de implementación.

- Realizar un plan para la implementación del sistema de recuperación de agua de alta calidad diseñado teniendo en cuenta los siguientes aspectos para su ejecución:
 - Revisiones periódicas del funcionamiento de trampas y limpieza de filtros.
 - Mantenimiento necesario para conservar el sistema trabajando en las condiciones óptimas.
- Designar una persona encargada del seguimiento a mediano y largo plazo del plan.

CAPÍTULO II. MARCO CONCEPTUAL Y TEORICO..

En este capítulo se presentan los conceptos claves y la fundamentación teórica necesaria para diseñar un sistema de recuperación de condensados para la planta de emulsión de Cerrejón. Primeramente, se expone un marco conceptual que abarca términos técnicos relacionados con la generación y distribución del vapor, luego se complementará con información de equipos utilizados en el campo de la recuperación de condensado y al finalizar se presentará un análisis bibliográfico con sus respectivas conclusiones.

1. Marco de referencia

1.1. Marco Conceptual

❖ Vapor de agua

El vapor de agua es el gas formado cuando el agua cambia de estado líquido a gaseoso, es cuando las moléculas de H_2O logran liberarse de las uniones que las mantienen juntas. (Teoria del Vapor: TLV, 2017)

Se genera cuando se le añade energía calorífica al agua. Se necesita añadir suficiente energía para que se eleve la temperatura del agua hasta su punto de ebullición. Después de esto cualquier energía adicional transforma el agua en vapor sin un incremento en la temperatura. (Teoria del Vapor: TLV, 2017)

❖ Título del vapor (Calidad)

Es la cantidad de vapor seco por kilogramo de vapor húmedo. El título x del vapor se puede expresar como porcentaje o como una fracción decimal. (Herranz, 2009)

❖ Entalpía

Es el término utilizado para designar la energía total, debido a la presión y a la temperatura de un fluido, líquido o vapor (tales como el agua y el vapor de agua), en cualquier momento y en condiciones dadas, y se representa con la letra H . (Daza, 2013)

La unidad básica de medida de cualquier tipo de energía es el joule (símbolo J). Actualmente se trabaja en Kilo Joules (KJ). (Daza, 2013)

❖ **Entalpía Específica:**

Es la entalpía (energía total) de una unidad de masa (1Kg). Las unidades normalmente usadas son KJ/Kg. (Herranz, 2009)

❖ **Entalpía del Líquido Saturado (Calor Sensible)**

La cantidad de calor necesario para llevar el agua desde su temperatura inicial de referencia (0°C) hasta su temperatura de ebullición sin cambio de fase se conoce como la entalpía del líquido (H_f) y está expresado en KJ/Kg.

❖ **Entalpía de Evaporación (Calor Latente Vaporización)**

El calor suministrado durante el período de ebullición, es utilizado para producir estrictamente el cambio de fase de líquido a vapor. La cantidad de calor necesario para llevar toda la masa de estado líquido a estado de vapor se conoce como la entalpía de evaporación (H_{fg}), está expresado en KJ/Kg y su valor depende de la presión. (Daza, 2013)

❖ **Entalpía del Vapor Saturado (Calor Total)**

Si a la entalpía de evaporación se le suma la del líquido, se obtendrá lo que se llama entalpía del vapor saturado (H_g) y está expresada en KJ/Kg. Es la cantidad total de calor que se debe suministrar a un Kilogramo masa de agua desde la temperatura de referencia (0° C) para transformarlo totalmente en vapor (Daza, 2013).

❖ **Volumen Específico**

El volumen específico (v) es el volumen ocupado por unidad de masa de un material. Es la inversa de la densidad, por lo cual no dependen de la cantidad de materia se expresa en m^3/kg (Daza, 2013).

❖ **Presión Absoluta y Presión Manométrica**

A la situación teórica de vacío perfecto o ausencia total de presión se le llama “*cero absoluto*” y la presión absoluta es la ejercida por encima del cero absoluto. (Daza, 2013)

❖ **Material estéril**

Se definen así el suelo, los sedimentos y las rocas que cubren el sub-afloramiento de carbón. Material de vena que prácticamente no contiene minerales de valor recuperables, que acompañan a los minerales de valor y que es necesario remover durante la operación minera para extraer el Carbón. (Glosarios especializados , 2017)

❖ **Mantos de carbón**

Los mantos de carbón pueden ser estratos esencialmente uniformes y continuos o, al igual que otros depósitos sedimentarios, pueden estar formados por diversas bandas y bancos de espesor variable. También como cualquier otro estrato sedimentario, los mantos de carbón pueden estar afectados estructuralmente por plegamientos y afallamientos, de manera que su posición original, aproximadamente horizontal, se pierde a tal grado que las capas pueden estar en posición vertical e inclusive invertida. (Carbón: Ecured, 2017)

❖ **Miscibilidad**

Miscibilidad es un término usado en química que se refiere a la propiedad de algunos líquidos para mezclarse en cualquier proporción, formando una solución homogénea. En principio, el término es también aplicado a otras fases (sólidos, gases), pero se emplea más a menudo para referirse a la solubilidad de un líquido en otro. El agua y el etanol (alcohol etílico), por ejemplo, son miscibles en cualquier proporción. Por el contrario, se dice que las sustancias son **inmiscibles** si en ninguna proporción son capaces de formar una fase homogénea. Por ejemplo, el éter etílico es en cierta medida soluble en agua, pero a estos dos solventes no se les considera miscibles dado que no son solubles en todas las proporciones. (Open Course Ware, 2017)

❖ **Reacción endotérmica**

Son aquellas que absorben energía en forma de calor. Una vez que la energía total se conserva del primer para el segundo miembro de cualquier reacción química, si una reacción es endotérmica, la entalpía de los productos H_p es mayor que la entalpía de los reactivos H_r , pues una determinada cantidad de

energía fue absorbida por los reactivos en forma de calor, durante la reacción, quedando contenida en los productos. (Reacción endotérmica: Ecured, 2017)

❖ **Generación de vapor**

La energía química contenida en el combustible de la caldera se convierte en energía calorífica al quemarse éste. Esta energía se transmite a través de las paredes del hogar de la caldera hasta el agua que contiene. Mediante la adición de dicha energía calorífica, la temperatura del agua aumenta hasta alcanzar el punto de saturación, en el que hierve y se convierte en vapor. (Herranz, 2009)

❖ **Emulsión: Tipo de agente de voladura.**

Sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles entre sí, una de las cuales se dispersa como pequeñas gotas (fase discontinua) dentro de la otra (fase continua). Este sistema requiere además otras sustancias (emulsificantes) para mejorar su estabilidad. (Rodríguez, 2017)

❖ **Potencial de Hidrogeno (pH)**

El pH es una unidad de medida que sirve para establecer el nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia. Cuando se obtiene mediante una medida de pH que un producto, sustancia o elemento es ácido, quiere decir que posee una alta o baja cantidad de iones de hidrógeno (dependiendo del nivel). Por su parte, que la medición arroje que una sustancia es alcalina (base), significa que no cuenta con estas concentraciones de iones de hidrógeno. Por lo tanto, el pH no es más que el indicador del potencial de hidrógenos. (Concepto de pH, 2017)

❖ **Agente de voladura**

Los agentes de voladura consisten en una mezcla de combustible y agentes oxidantes, ninguno de los cuales se los considera explosivos. Un agente de voladura consiste de nitratos inorgánicos y combustible de carbón, puede contener otras sustancias no explosivas tales como polvo de aluminio o ferrosilicona, con el fin de aumentar su densidad. La adición de explosivos y calor de detonación, por ejemplo, TNT, a este tipo de mezcla cambia la clasificación de agentes explosivos a explosivos. Debido a su inaccesibilidad los agentes explosivos deben ser inicializados por un explosivo. (Conceptos básicos sobre voladuras, 2017)

❖ **Accesorios de voladura.**

Dispositivos requeridos para la iniciación del explosivo; tales como: cable de ignición, detonador común, mecha de seguridad, detonador eléctrico, detonador no eléctrico, fulminantes, cordón detonante, multiplicador. (Indumil, 2017)

❖ **Dureza**

La dureza representa una medida de la cantidad de metales alcalinotérreos en el agua, fundamentalmente Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) provenientes de la disolución de rocas y minerales que será tanto mayor cuanto más elevada sea la acidez del agua. Es una medida, por tanto, del estado de mineralización del agua. La dureza está relacionada con el pH y la alcalinidad; depende de ambos. (El agua. Calidad y contaminación., 2017)

❖ **Agua de alta calidad**

Agua proveniente del acuífero, subterráneo y superficial del Río Ranchería (principal afluente del departamento de La Guajira).

❖ **Condensado**

Condensado es el líquido formado cuando el vapor pasa de fase gas a fase líquida. En un proceso de calentamiento, el condensado es el resultado del vapor que transfirió parte de su energía calorífica, conocida como calor latente, al producto, línea o equipo que debe ser calentado. Agua residuo del proceso de generación de vapor que se realiza para calentamiento de una sustancia. (¿Qué es el Condensado?: TLV. Compañía Especialista en Vapor, 2017)

❖ **Generación de vapor en la industria.**

Gracias a las propiedades sobresalientes de transferencia de calor, el vapor es ampliamente usado como medio de energía. Varios métodos y procesos son usados para la generación de vapor con propiedades requeridas por los consumidores individuales en sus sistemas específicos. Es importante diseñar un sistema de vapor eficiente que eviten desperdicios de vapor y condensado y la energía contenida él, para lo cual es importante la selección adecuada de los diferentes componentes y accesorios del sistema. (Santillan: Vapor, 2017)

La generación de vapor a nivel industrial se realiza principalmente por medio de calderas, en las cuales se evapora agua por medio de la adición de calor obtenida gracias a la quema de un combustible. El ciclo ideal del vapor se muestra en la figura 4. Idealmente se aprovecha toda la energía liberada por la combustión, evaporando el agua dentro de la caldera. El vapor se transporta hasta los usuarios, siendo estos, por ejemplo, intercambiadores de calor o tanques enchaquetados, en ellos se condensa el vapor proporcionando la energía requerida. Los condensados del vapor se recuperan y se alimentan nuevamente a la caldera. (Marroquín, 2013)

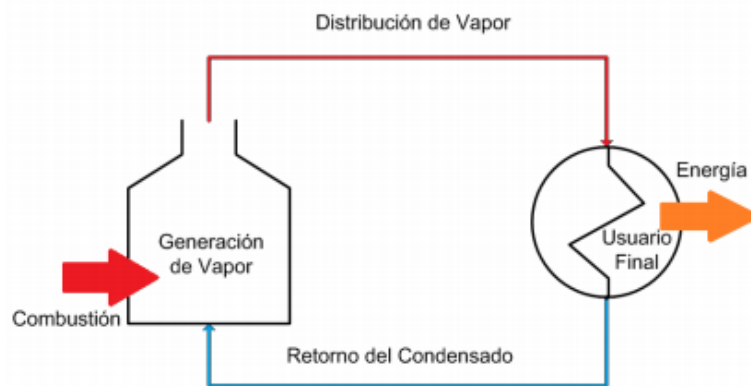


Figura 1. Ciclo ideal de generación de vapor. (Marroquín, 2013)

En la realidad se tienen diversas pérdidas de energía y agua en un sistema de vapor. Estas pérdidas se representan, de una manera general, en la figura 5.

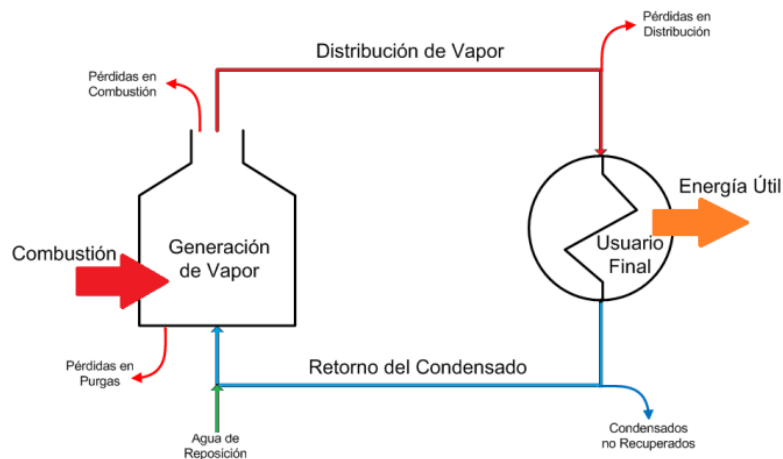


Figura 2. Ciclo de vapor real. (Marroquín, 2013)

Existen diversas pérdidas de energía en la generación de vapor. No se aprovecha totalmente el calor liberado en la combustión ya que los gases de combustión salen a una temperatura alta, aproximadamente 160 °C y existe una resistencia a la transferencia de calor hacia el agua, causada por el material de la caldera y por posibles incrustaciones.

Las purgas de las calderas pirotubulares por ejemplo, son necesarias para evitar la excesiva formación de depósitos en las superficies de intercambio de calor, pero a la vez son una pérdida de energía ya que el agua desechada posee calor sensible. Se pierde energía en la distribución del vapor debido a la transferencia de calor que existe a través de la tubería, lo cual provoca la condensación del vapor dentro de las tuberías. Es frecuente la pérdida de alguna parte de los condensados de vapor, principalmente por evaporación instantánea. (Marroquín, 2013)

Los constituyentes básicos de un sistema de generación de vapor son: las calderas, donde se evapora el agua; la línea de distribución, la cual lleva el vapor a su destino final; la línea de retorno de condensados y un sistema de tratamiento de agua. Posteriormente, se describen los equipos mencionados.

❖ **La caldera.**

Las calderas son la parte más importante del circuito de vapor, después de todo, es donde se crea el vapor. Una caldera puede definirse como un recipiente en el que se transfiere la energía de calorífica de un combustible a un líquido. En el caso de vapor saturado, la caldera proporciona también energía calorífica para producir un cambio de la fase de líquido a vapor.

Históricamente, la sala de calderas de vapor siempre ha exigido a un nivel alto de vigilancia manual para proporcionar la seguridad necesaria para la planta. La manera actual de pensar exige que esta planta trabaje eficazmente, y se puede hacer igualando lo máximo posible el suministro a la demanda. En algunos casos, esto puede significar calderas que trabajan continuamente, o en otros, paradas durante intervalos largos o cortos. De cualquier modo, la tecnología moderna permite al ingeniero de la planta escoger el régimen de la caldera confiadamente para ajustarse mejor a su aplicación, con sistemas de control capaces de proporcionar el grado requerido de eficacia, integridad y seguridad.

Una caldera es a menudo el equipo más grande que se encuentra en un circuito de vapor. Su tamaño puede depender de la aplicación en la que se usa. En una instalación grande, donde existen cargas de vapor variables, pueden usarse varias calderas. (Spirax Sarco)

➤ **Tipos de caldera según la circulación de fluidos dentro de los tubos de la caldera**

- ✓ **Calderas Acuotubulares:** El agua circula por dentro de los tubos, captando calor de los gases calientes que pasan por el exterior. Permiten generar grandes cantidades de vapor sobrecalentado a alta presión y alta temperatura. Este tipo de calderas maneja presiones de 0 a 2200 psig. Con la finalidad de obtener un mayor rendimiento en la caldera, se les suele instalar economizadores y precalentadores, que hacen que la temperatura de los gases a su salida de la caldera, sea menor, aprovechando así mejor el calor sensible de dichos gases.
- ✓ **Calderas Pirotubulares:** En estas calderas los humos (gases calientes) pasan por dentro de los tubos cediendo su calor al agua que los rodea. Para presiones máximas de 20 bar (290 psig) y consumos hasta 30 Ton/hr. Son económicas, de alto rendimiento y de fácil mantenimiento.

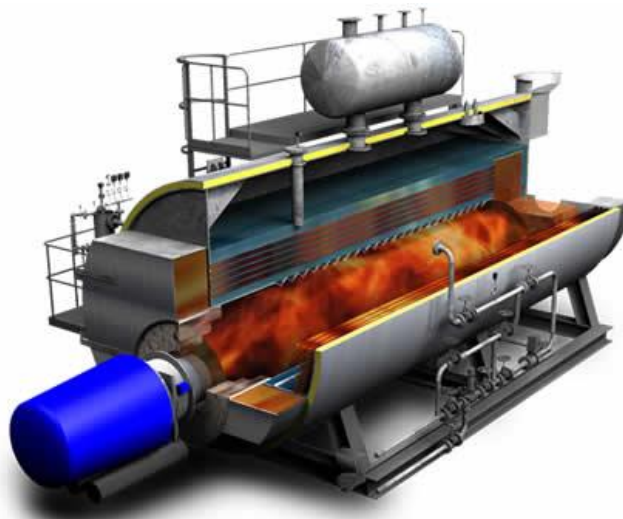


Figura 3. Caldera pirotubular.

Para evitar los distintos problemas ocasionados por la acumulación de los componentes del agua de alimentación en las calderas, se han establecido las concentraciones máximas de estos (según Norma BS 2486), las cuales se presentan a continuación:

Tabla 2. Concentraciones permitidas en las calderas. (British Standard: Treatment of water for steam boilers and water., 1997)

Parámetro	Valor recomendado
pH a 25°C	10.5-11.8
Alcalinidad total (ppm)	<700
Alcalinidad Caustica (ppm)	>350
Secuestrantes de Oxígeno:	
• Sulfito de sodio (ppm)	30-70
• Hidrazina(ppm)	0.1-10
• Taninos(ppm)	120-180
• Dietilhidroxilamina (ppm)	0.1-1.0
Fosfato de sodio (ppm)	30-60
Hierro(ppm)	<3.0
Sílice(ppm)	150
Sólidos disueltos(ppm)	<3500
Sólidos en suspensión (ppm)	<200
Conductividad (uS/cm)	<7000
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles

1.2. Marco Teórico

1.2.1. Sistema de recuperación de condensados

En todas las líneas y equipos de vapor siempre existe condensación debido al gradiente térmico existente entre las paredes interiores de la conducción, en contacto con el vapor, y las paredes exteriores, que están a temperatura ambiente (con o sin aislamiento).

Mediante la instalación de un sistema de recuperación de condensados no sólo se recupera la masa de agua tratada, sino también la energía térmica que contiene.

El condensado es una fuente valiosa y aun recuperado en pequeñas cantidades es económicamente justificable. La descarga de una simple trampa de vapor vale la pena recuperarla. El condensado que no se recupera debe ser reemplazado en la caldera utilizando agua fría de la red de agua potable con un costo adicional de tratamiento de agua y combustible para calentar el agua que ingresa a baja temperatura.

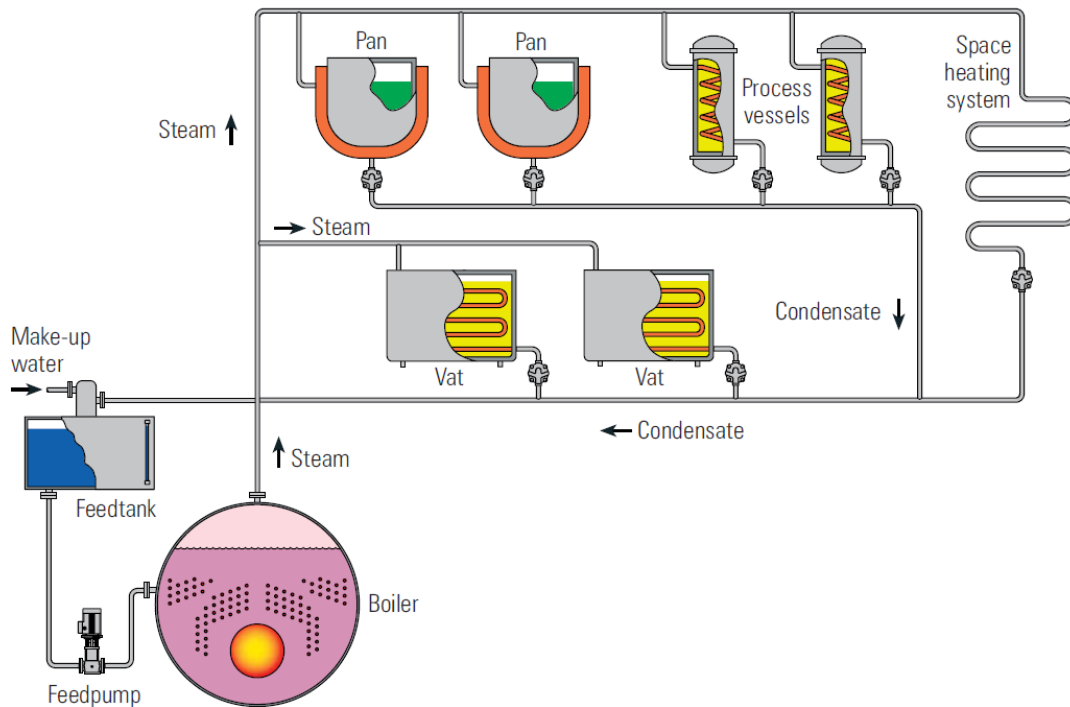


Figura 4. Proceso de recolección de condensados.

El condensado es agua destilada, y casi no contiene sólidos disueltos totales (SDT). Las calderas necesitan purgar agua de su interior para evitar la concentración de los SDT. Retornar más condensado al tanque de agua de alimentación reduce la necesidad de purgas de calderas y así mismo disminuye la pérdida de energía de la caldera.

Las trampas para vapor son capaces de retornar el condensado, siempre y cuando la presión diferencial a través de ellas sea positiva. La descarga de condensado en cada trampa está acompañada con vapor flash (vapor que se forma a partir del condensado caliente cuando existe una reducción en la presión) las líneas de retorno bien dimensionadas pueden ser capaces de manejar el condensado descargado tanto de trampas operando a alta presión o incluso trampas que operen a baja presión.

Sin embargo, hoy día se experimentan muchos problemas alrededor del retorno de condensado haciendo uso de las trampas. Entre las razones principales, se tiene que las trampas no cuentan con la presión diferencial suficiente para retornar el condensado; además de esto las altas elevaciones en las que se encuentran las tuberías de retorno, los diámetros inadecuados (pequeños) de las líneas, fuga de vapor vivo a través de trampas causan que el condensado no fluya como debería ser.

Los principales problemas que presenta el condensado son:

- Corrosión de las superficies metálicas.
- Disminución del coeficiente de transmisión de calor.
- Golpe de ariete que puede llevar asociado el condensado, por el flujo de vapor en forma de partículas por el interior de la conducción que alcanzan velocidades de hasta 45 m/s.

El golpe de ariete se produce cuando el condensado, en vez de ser purgado en los puntos bajos del sistema, es arrastrado por el vapor a lo largo de la tubería y se detiene bruscamente al impactar con algún obstáculo del sistema.

Para evacuar el condensado del sistema de vapor, se instalan trampas de vapor, purgadores, entre otros aparatos, cuya función principal es eliminar el condensado, el aire y otros gases no condensados de las redes principales y de los equipos que trabajan con vapor, lo más rápidamente posible.

1.2.2. Equipos utilizados en los sistemas de recuperación de condensados.

1.2.2.1. Purgadores de vapor para eliminar el condensado del sistema de vapor

Para poder recuperar y reutilizar el condensado primero hay que extraerlo del sistema de vapor. El purgador de vapor es el enlace más importante en el circuito de condensado, ya que se conecta con la zona de uso de vapor con el retorno de condensado reteniendo el vapor dentro del proceso para el máximo aprovechamiento del calor, mientras que elimina los gases no condensables y condensado en el momento adecuado. (Spirax Sarco, 2017)

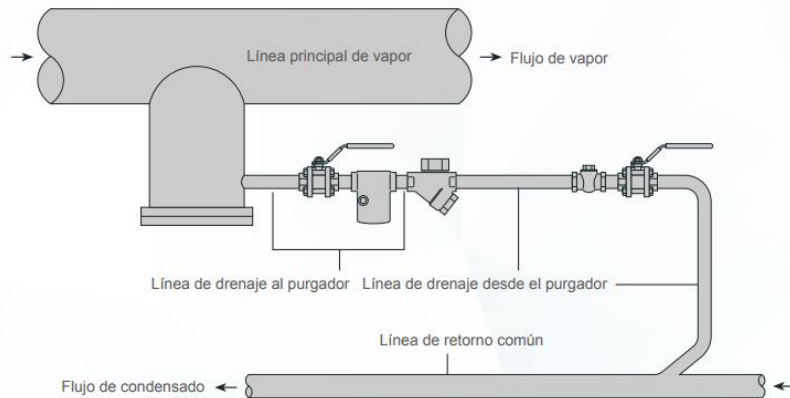


Figura 5. Un purgador de vapor descargando a una línea de retorno de condensado común. (Spirax Sarco, 2017)

El vapor se condensa cuando cede su calor. El condensado resultante debe ser eliminado del sistema o se podría producir una mala transferencia de calor y la posibilidad de problemas por golpes de ariete. El aire y los otros gases no condensables también deben eliminarse o se puede producir una transferencia de calor deficiente y problemas de corrosión. Un buen punto de partida en cualquier proyecto para mejorar la recuperación de condensado, además de ser una de las medidas más rentables, es encargar una revisión profesional de purgadores de vapor para identificar las mejoras que se podrían lograr. Esta revisión también le proporcionará una estimación de los ahorros potenciales a través de actuaciones, proporcionando información para ayudar a justificar los gastos de mantenimiento. (Spirax Sarco, 2017). Un purgador de vapor es un tipo de válvula que filtra de forma automática el condensado (en este caso vapor condensado) y gases no condensables como lo es el aire sin dejar escapar al vapor. (García, 2017)



Figura 6. Purgador (García, 2017)

Los purgadores pueden clasificarse por su funcionamiento en tres grandes grupos:

- **Tipo Termostáticos:** Identifica el vapor y el condensado mediante la diferencia de temperatura. El condensado debe enfriarse por debajo de la temperatura de vapor antes de ser eliminado.
- **Tipo Mecánico:** Operan mecánicamente por diferencia de densidades entre vapor y condensado. El movimiento de una boya o una cubeta actúa sobre la válvula.
- **Tipo termodinámico:** Trabaja por la diferencia de velocidades entre vapor y condensado. La válvula consiste en un disco que se cierra por la alta velocidad del re-vaporizado y abre con la baja velocidad del condensado. (Garcia, 2017)

Amortización rápida de las revisiones de purgadores de vapor: Una revisión de purgadores de vapor ayudará a mantener un sistema funcionando sin problemas y es casi seguro que desvelará los posibles ahorros gracias a la reducción en el consumo de combustible, emisiones, agua y costes de vertidos. Por ejemplo, en una revisión a 50 purgadores de vapor existe un potencial de ahorro energético anual de €28.400 por revisión. El periodo medio de amortización en cada revisión, incluyendo el costo de los productos de sustitución y su instalación, es de aproximadamente dos meses una vez completado todo el trabajo recomendado en la revisión. (Spirax Sarco, 2017)

1.2.2.2. Uso de bombas para retornar el condensado al tanque de alimentación de caldera

En condiciones normales el condensado debería descargar a través del purgador por diferencia de presiones. En algunos casos esto no es posible y tiene que ser elevado a un nivel más alto. La elevación del condensado de los purgadores requiere que haya suficiente presión de vapor en el sistema para superar la elevación. Sin embargo, no siempre hay suficiente presión de vapor disponible para eliminar el condensado. En este caso, puede ser necesario algún tipo de equipo de bombeo. (Spirax Sarco, 2017)

➤ Bombas de condensado centrífugas eléctricas

Las estaciones de bombeo eléctricas son muy adecuadas para aplicaciones en las que se debe manejar grandes volúmenes de líquido y se construyen por lo general como Unidades de Recuperación de Condensado (CRU), las cuales constan generalmente de un receptor, un sistema de control operado por sondas o flotadores y una o dos bombas. Las bombas eléctricas deben ser diseñadas y seleccionadas para que puedan manejar condensado caliente sin el riesgo de cavitación y daños a la bomba. Las bombas para esta aplicación deben ser capaces de operar con una mínima Altura de aspiración positiva neta (NPSH) cuando manejan condensado muy caliente. (Spirax Sarco, 2017)

➤ Bombas de condensado mecánica

Las bombas mecánicas de condensado constan de un cuerpo en el cual el condensado entra por gravedad, dentro contiene un flotador y un mecanismo automático que acciona a un conjunto de válvulas de conmutación. Se permite al condensado acumularse en el interior del cuerpo accionando un flotador. Cuando el flotador alcanza un determinado nivel, el mecanismo de la válvula cambia de situación forzando a la válvula de entrada de vapor a abrirse y a cerrar la válvula de escape, permitiendo la entrada de vapor y presurizando el cuerpo para impulsar hacia fuera el condensado. Cuando el nivel de condensado baja también lo hace el flotador. El mecanismo hace que la válvula de entrada de vapor se cierre y abra la válvula de escape permitiendo al líquido volver a llenar el cuerpo de la bomba. Dos válvulas de retención instaladas en la entrada y salida de la bomba aseguran la dirección correcta del flujo. (Spirax Sarco, 2017)

Las bombas mecánicas requieren de un receptor que se debe utilizar cuando la bomba está descargando, ya que no se estará llenando. Esto significa que no tiene que haber un lugar donde se pueda almacenar el condensado entre ciclos de bombeo. En segundo lugar, la fuerza de accionamiento de una bomba mecánica proviene del vapor que se puede retornar al sistema, por lo que incurre en costes de energía mínimos. Además, la alta temperatura del condensado que necesita ser manejada puede causar problemas en una bomba centrífuga. Como el condensado es aspirado en la entrada de una bomba centrífuga a una presión más baja, se produce revaporizado en la bomba, reduciendo seriamente la capacidad de bombeo. La cavitación, causada por el

colapso de burbujas de vapor dentro del impulsor de la bomba también puede erosionar la bomba y reducir su vida útil. (Spirax Sarco, 2017)

➤ Bombas-purgador automáticas

Las purgadoras de vapor convencionales necesitan una presión de vapor aguas arriba que sea mayor que la presión aguas abajo para poder desalojar el condensado de tuberías y de los equipos. Sin embargo, en los intercambiadores de calor de placas de uso común en las aplicaciones de procesos, cuando cae la demanda de calor, también lo hace la presión aguas arriba y las purgadoras de vapor no pueden desalojar el condensado. (Spirax Sarco, 2017)

Las consecuencias pueden ser una ralentización del proceso, una caída en la eficiencia de energía, ruidos y vibraciones en el intercambiador de calor, rotura de tubos, mayores requisitos de mantenimiento e incluso un proceso con una interrupción de flujo. (Spirax Sarco, 2017)

La forma más eficaz para eliminar el condensado de los intercambiadores de calor en estas situaciones, así como en otras aplicaciones donde no hay suficiente presión para desalojar el condensado, es instalando una bomba purgadora automática. (Spirax Sarco, 2017)

Al igual que las bombas de condensado mecánico las bombas purgador automáticas son unidades autónomas compactas que utilizan vapor de la planta para proporcionar la fuerza de accionamiento para bombear condensado, incluso bajo condiciones de vacío. En funcionamiento, el condensado entra en la cámara a través de la válvula de entrada. (Spirax Sarco, 2017)

Normalmente, el condensado fluye libremente a través de la cámara al sistema de retorno de condensado. Sin embargo, si existe una contrapresión que impide que el condensado salga normalmente, se cierra la válvula de salida de condensado de la bomba purgador. El condensado continúa fluyendo hasta llenar la cámara. (Spirax Sarco, 2017)

1.2.3. Calentamiento y desgasificación del tanque de alimentación en el sistema de recuperación de condensado.

Una vez que el condensado retorna al tanque de alimentación, este debe ser mezclado con el agua de alimentación para aumentar la temperatura. Sin embargo, simplemente alimentar el condensado por la parte superior del tanque de agua de alimentación puede ser bastante ineficiente. A medida que cae a través del espacio por encima del agua, se pueden perder el vapor y la energía y no menos importante, absorber aire, lo que podría provocar corrosión en la caldera y la planta de vapor. (Spirax Sarco, 2017)

El desgasificador es un equipo que elimina el oxígeno y otros gases contenidos en el agua de alimentación de modo que se evite la corrosión de elementos y tramos que componen el circuito agua-vapor de la planta. En medio acuoso, el hierro se oxida a hidróxido ferroso por la acción del ion hidroxilo. Este por acción de oxígeno en disolución pasa a hidróxido férrico (de color rojizo), que implica corrosión. A elevadas temperaturas el hidróxido ferroso se convierte a una capa densa de protección de color negro denominada magnetita, que protege el metal del agua y del oxígeno. Sin embargo, esta capa que va creciendo conforme a las horas de funcionamiento de la planta, puede provocar graves averías porque su apilamiento genera grietas en los tubos y conductos de los equipos, que se someten a altas temperaturas, motivadas por la escasa transferencia de calor y a otros fenómenos mecánicos como desgarramientos producidos por la consecuente dilatación térmica descontrolada. Debido a esto, se requiere de una adecuada intervención que impida la presencia de O_2 y otros gases en un medio acuoso como el que se trata en plantas con vapor. (Gómez, 2014)

En una planta de producción de vapor este equipo tiene las siguientes funciones:

- Eliminación de gases: Debido al aumento de la temperatura del agua, los gases disueltos se eliminan y se aprovecha la solubilidad inversa de los gases, según la cual los gases son menos solubles en agua a alta temperatura.
- Precalentamiento del agua: Precalienta el agua con una nueva extracción de vapor de la turbina de baja presión, logrando elevar la temperatura del agua mezclando ésta con vapor extraído de la turbina de baja presión. Incluso cuando la turbina no está en funcionamiento, pero hay vapor en la

línea de vapor sobrecalentado, se adiciona una parte del agua directamente al tanque a través de unas boquillas situadas en la parte inferior de éste.

- Acumulador de agua: Acumular agua a alta temperatura para alimentar las bombas de alta presión con las que se hace circular el agua condensada a través del tren de generación de vapor.
- Evita cavitación: Proporcionar la presión hidrostática necesaria (NPSH) para evitar el fenómeno de cavitación de las bombas de alimentación. (Gómez, 2014)

Se puede dispersar el oxígeno en el agua de alimentación por calentamiento y se absorbe por tratamiento químico. Al calentar el agua de alimentación a 85°C se elimina la mayor parte del oxígeno, reduciendo hasta en un 75% la cantidad requerida de productos químicos. La solución más eficiente para calentar y desgasificar se consigue usando un cabezal desgasificador que mezcla el agua de aportación fría, con su alto contenido en oxígeno, con el revaporizado del condensado y la recuperación de calor de las purgas. El aireador condensa el revaporizado asegurando que vuelva a entrar en el tanque de alimentación de caldera de manera eficiente y sin problemas operativos. (Spirax Sarco, 2017)

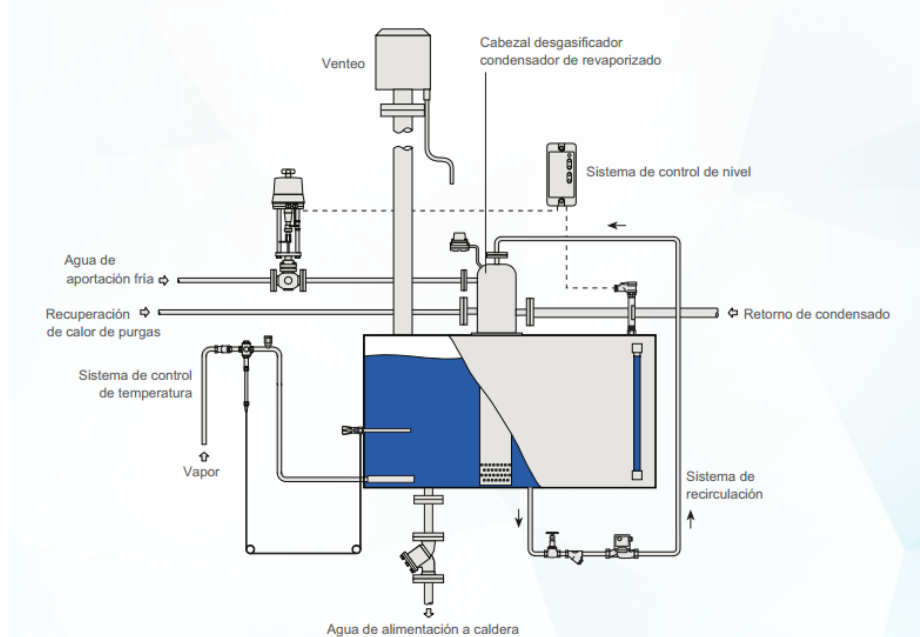


Figura 7. Desgasificador. (Spirax Sarco, 2017)

1.2.4. Transferencia de calor.

Cuándo dos sistemas entran en contacto, el calor se propaga de forma espontánea desde el sistema con mayor temperatura hacia el sistema con menor temperatura hasta alcanzar el equilibrio térmico, uno de los componentes del estado de equilibrio termodinámico.

Lo mismo ocurre dentro de un mismo sistema en el que exista un gradiente térmico, el calor se propagará desde las zonas de mayor temperatura hacia las zonas de menor temperatura. (Lienhard IV, 2000)

Esta transmisión o **transferencia de calor** se puede producir de tres formas:

- Conducción
- Radiación
- Convección

La convección térmica es, por tanto, una forma de transferencia de calor. En concreto, es la transferencia de calor que se produce en medios fluidos debido al movimiento de grupos de moléculas mediante difusión.

Además de la convección, el calor se puede transmitir mediante radiación y mediante conducción. De hecho, lo más común es que el calor de un objeto se transmita de varias formas a la vez. A diferencia de la convección, en la radiación y en la conducción no interviene desplazamiento de masa.

En el caso de la radiación, el calor se transmite mediante ondas electromagnéticas que se producen por cambios en la configuración electrónica de los átomos y moléculas del sistema. La transmisión por radiación, que se da en cualquier superficie de temperatura finita, hace posible que se pueda transmitir calor entre dos superficies en ausencia de medio y sin contacto directo. (Lienhard IV, 2000)

La cantidad de calor irradiado por una superficie se rige por la Ley de Stefan-Boltzmann y se puede dar en cualquier medio, ya sea sólido, líquido o gaseoso.

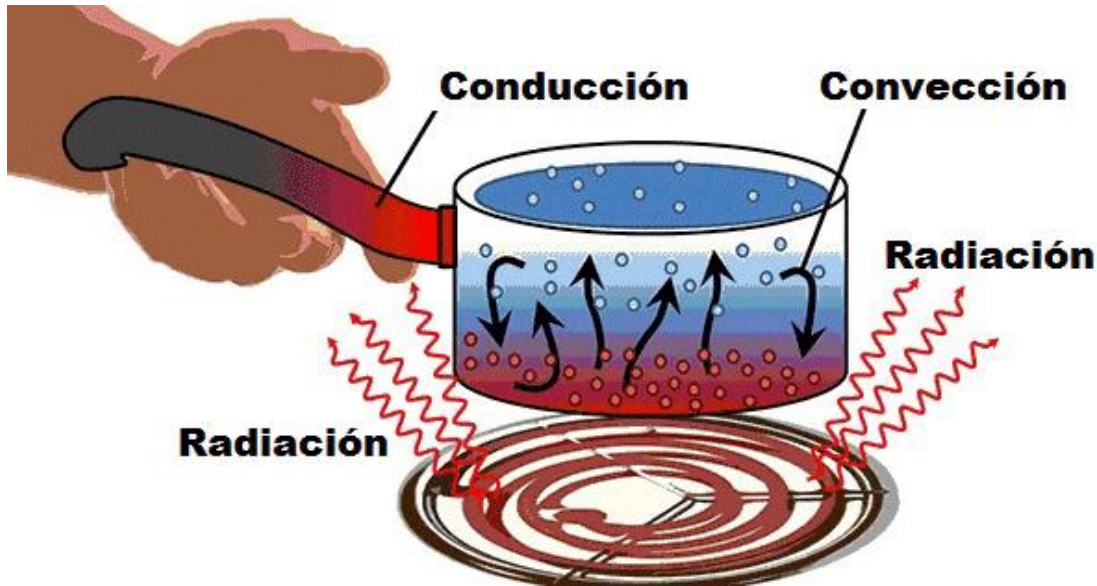


Figura 8. Transferencia de calor. (Lienhard IV, 2000)

Las tres formas de transmisión de calor: conducción, convección y radiación

En el caso de la conducción, por el contrario, la transmisión de calor requiere contacto directo entre partículas, y por tanto requiere de un medio material. A mayor temperatura, los átomos y moléculas tienen una mayor vibración, más energía cinética. Al chocar diferentes partículas, las de mayor movimiento pueden acelerar a las más lentas; las primeras ceden parte de su energía cinética y se enfrían, mientras que las segundas absorben la energía cinética y se calientan. (Lienhard IV, 2000)

La tasa de transmisión de calor por conducción se rige por Ley de Fourier y se puede dar en cualquier medio, aunque en fluidos sólo se daría conducción pura si se pudiera excluir la convección. Y lo mismo ocurre al contrario, la convección pura solo se daría si se pudiera excluir la conducción. (Lienhard IV, 2000)

2. Análisis bibliográfico y conclusiones.

Se ha realizado la búsqueda de artículos científicos relacionados con la recuperación de condensado, en temas asociados a la gestión eficiente de la energía suministrada por el vapor producto de las calderas, así como proyectos y tesis en este campo.

Como primera aproximación se ha analizado la información proporcionada por **Spirax Sarco** una empresa especialista en proveer soluciones a la industria en relación al sistema de generación de vapor, la cual posee un material amplio en la recuperación de condensado brindando documentación y especificaciones de los equipos que se utilizan frecuentemente en estos sistemas. Por medio del documento **“Recuperación de condensado en sistemas industriales de vapor”** en el cual el autor introduce el tema de reutilización de este recurso hídrico, su importancia y el ahorro que como consecuencia se produciría y a su vez explica a cerca de las algunas tecnologías existentes actualmente.

Como resultado de la búsqueda se encontró la tesis de maestría titulada **“Sistema de Recuperación de Condensados de una Línea de Decapado de Bobinas Laminadas en Caliente”** en la cual el autor expone el diseño realizado para un sistema de recuperación de condensado en una empresa del sector siderúrgico.

En conclusión, el análisis bibliográfico confirma que es viable la recuperación de condensados en la industria.

CAPITULO III. DIAGNOSTICO DEL SISTEMA DE GENERACION Y DISTRIBUCION DE VAPOR.

En el siguiente capítulo se expone el desarrollo de la metodología propuesta para el diseño de un sistema de recuperación de condensados.

El sector industrial es uno de los que tiene mayor demanda energética y por ende presenta un elevado potencial de ahorro basado en la **eficiencia energética**. Además, el vapor también es considerado como un recurso energético importante y un servicio altamente empleado en la industria mundial al ser una forma práctica de proporcionar energía térmica a procesos de transformación de materias primas para obtener distintos productos. (BAENA, 2015). Por esto se realizará un diagnóstico del sistema de generación y distribución de vapor partiendo de los antecedentes conocidos en el ámbito de la recuperación de condensado.

1. Etapa 1: Análisis de las tecnologías existentes en la recuperación de agua, basado en la literatura y visita industrial.

Se identificaron tres casos representativos de diferentes industrias por medio de la literatura, en donde se aplicó un sistema de recuperación de condensados.

1.1. Revisión de artículos

En la tabla 3, se registró el tipo de industria, características y equipos utilizados de los artículos revisados: *“Técnicas de Gestión Energética en Sistemas de Vapor”* escrito por J.L. Palacio, A. Peña y V. Hidalgo, el cual recoge experiencias en tecnologías utilizadas en la gestión energética durante la realización de una auditoría a una planta industrial alimenticia y en la inspección de las trampas de vapor allí instaladas, también la tesis *“Definición de una metodología de diagnóstico en eficiencia energética aplicable a calderas convencionales de vapor”* de Daniel Hincapié, donde se realizó una revisión bibliográfica del estado actual en temas de eficiencia energética en el panorama mundial, propiamente en el sector industrial de Colombia, además *“Sistemas de recuperación de condensados”* de Spirax Sarco, informe en el cual se exponen equipos utilizados actualmente en la recuperación de condensados.

1.2. Visita a plantas similares con sistemas de recuperación de agua.

El 9 de diciembre de 2016 un funcionario de la empresa como se observa en la figura 10 realizó una visita a la planta de fabricación de nitrato de amonio y emulsión PRILLEX® AMERICA de la empresa ENAEX (Figura 9) ubicada en Mejillones, Chile.

Esta planta se encuentra ubicada en la zona desértica de la región de Antofagasta. Por lo tanto, se hizo necesaria la implementación de un sistema de recuperación de condensados con el fin de disminuir el consumo de este recurso natural. Se evidenció que este sistema logra una recuperación cercana al 80%. (Orozco Roca, 2018)



Figura 9. Planta PRILLEX® AMERICA de la empresa ENAEX (Planta Prillex® América, 2016)



Figura 10. Funcionario en visita a la planta PRILLEX® AMERICA (Planta Prillex® América, 2016)

1.3. Viabilidad de la implementación la literatura estudiada y en la visita industrial realizada.

La tabla 3 recopila la información encontrada en los artículos científicos estudiados y la visita realizada a la planta PRILLEX® AMERICA de la empresa ENAEX, se relaciona el tipo de industria, sus características y los equipos utilizados en el sistema de recuperación de condensados.

Tabla 3. Análisis bibliográfico.

Nombre del artículo o Fuente	Autores/ Empresa	Tipo de industria	Características	Equipos utilizados
Técnicas de gestión energética en Sistemas de vapor	J.L. Palacio, A. Peña y V. Hidalgo	Alimenticia	100 m ³ / día de consumo de agua.	Tanque y bomba accionada eléctricamente
Definición de una metodología de diagnóstico en eficiencia energética aplicable a calderas convencionales de vapor.	Daniel Hincapié	Fertilizantes	Uso correcto de trampas para recolección de condensado.	Trampas dimensionadas por la carga de condensado.
Sistemas de recuperación de condensados	Spirax Sarco	Aplicable a todas las industrias.	Varios equipos que se acoplan para recuperar condensado.	NA
Visita industrial a la empresa Planta PRILLEX AMERICA	Enaex	Explosivos	Recupera aproximadamente 80% del condensado.	NA

Con base en la lectura de los artículos mencionados y a partir de la visita realizada a la planta PRILLEX® AMERICA donde se evidenció el funcionamiento eficiente de sistemas de recuperación de condensados, por lo tanto se concluye que es factible la implementación de un sistema similar.

2. Etapa 2: Requerimientos de diseño del sistema.

En la presente etapa se identifican los requerimientos y limitantes del proceso de generación y distribución de vapor en la planta de emulsión, los cuales se tendrán en cuenta al momento de realizar el diseño detallado del sistema de recuperación de condensados, así mismo, se busca validar el correcto funcionamiento de las trampas de vapor, identificar los consumos de vapor en cada proceso de calentamiento y establecer la presión y temperatura de operación actual.

2.1. Parámetros del proceso de generación de vapor.

En esta sección se determinan los parámetros del proceso de generación y distribución de vapor partiendo de los componentes principales del sistema, luego se calcula el consumo de vapor general de toda la planta, las perdidas por fugas y la cantidad de gas requerida, estos cálculos se convertirán en los requerimientos para la propuesta de diseño del sistema de recuperación de condensado.

2.1.1. Determinación de los parámetros del sistema de generación y distribución de vapor.

Los elementos de un sistema de vapor son: **el generador de vapor o caldera, el sistema de distribución, los equipos de consumo de vapor y el retorno de condensado.** Todos los elementos del sistema interactúan entre sí. Si existe mal funcionamiento en algunos de sus elementos la operación de todo el sistema de vapor será afectado, lo que ocasionaría importantes pérdidas de energía con pérdidas económicas considerables.(Palacios, Peña, & Hidalgo, 2015)

- **Generador de vapor o caldera**

El sistema de generación y distribución de vapor de la planta de emulsión consta de 3 calderas de 200, 500 y 100 BHP respectivamente, de las cuales, la caldera 2 (500 BHP) se encuentra en funcionamiento 24 horas de manera continua mientras que las calderas 1 (200 BHP) y 3 (100BHP) se utilizan como respaldo.

Las calderas producen vapor a 60 psi y por medio de una válvula reguladora se disminuye a una presión de 15 psi requerida por el proceso de fabricación de emulsión.

- **El sistema de distribución y equipos de consumo de vapor.**

El vapor producido en las calderas es distribuido en tuberías de acero al carbón hacia los equipos de consumo conformados por siete tanques (tres tanques de agua industrial y cuatro tanques de Solución Oxidante). Luego de ceder su energía en los tanques, el vapor se transforma en condensado y se acumula en las tres trampas de vapor instaladas sin ser retornado a la caldera.

2.1.2. Producción de vapor.

Se calcula la máxima producción de vapor de las calderas que se encuentran en la planta de emulsión y se compara con los requerimientos de vapor.

El vapor producido se utiliza en tres (3) subprocesos de calentamiento en la planta:

1. Precalentamiento de agua en el tanque de alimentación a las calderas.
2. Calentamiento de tres (3) tanques de agua industrial.
3. Calentamiento de solución oxidante en cuatro (4) tanques. (Proceso discontinuo o Semi-batch)

- **Producción de vapor de las calderas de planta emulsión.**

Teniendo en cuenta el factor de conversión $1 \text{ BHP} = 34.5 \text{ lb/hr}$

$$\text{Caldera 1 (200 BHP): } 200 \text{ BHP} \frac{34.5 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \text{ de vapor}}{1 \text{ BHP}} = 6900 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \text{ de vapor.}$$

$$\text{Caldera 2 (500 BHP): } 500 \text{ BHP} \frac{34.5 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \text{ de vapor}}{1 \text{ BHP}} = 17250 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \text{ de vapor.}$$

$$\text{Caldera 3 (100 BHP): } 100 \text{ BHP} \frac{34.5 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \text{ de vapor}}{1 \text{ BHP}} = 3450 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \text{ de vapor.}$$

La capacidad máxima de producción de vapor del sistema de generación de planta emulsión es de **$27600 \frac{lb}{hr}$ de vapor.**

Por medio del factor de conversión: $1 lb = 0.453592 Kg$

$$27600 \frac{lb}{hr} \text{ de vapor} \frac{0.453592 Kg \text{ de vapor}}{1 lb \text{ devapor}} = 12519.14 \frac{kg}{hr} \text{ de vapor}$$

Capacidad maxima de producción de vapor $\left(\frac{Kg}{hr}\right)$: $12519.14 \frac{kg}{hr}$ de vapor

La capacidad máxima de producción de la Caldera 2 (500 BHP) en Kg/hr:

$$17250 \frac{lb}{hr} \text{ de vapor} * \frac{0.453592 Kg \text{ de vapor}}{1 lb \text{ de vapor}} = 7824.46 Kg \text{ de vapor/hr}$$

A partir de la formula general para la transferencia de calor (Cengel & Boles, 1976) se calculan las cargas térmicas de cada uno de los procesos de calentamiento:

$$m_v = \frac{m Cp \Delta T}{t h_{fg}} \quad (1)$$

Dónde:

m_v : Masa de vapor requerida

m : Masa de la sustancia a calentar

Cp : Capacidad calorifica de la sustancia a calentar

t : tiempo de calentamiento

h_{fg} : Entalpía específica de evaporación a la presión de trabajo

$\Delta T = T_2 - T_1$ donde:

T_2 : Temperatura a la cual se requiere la sustancia.

T_1 : Temperatura inicial

2.1.3. Presión y temperatura de operación actual.

Se identifican las condiciones de operación de la planta de emulsión: Una presión de 15 psi y una temperatura de 70°C es encontrada en las trampas FT 14-10 de ¾ que remueven condensado de las líneas de distribución de vapor.

2.1.4. Precalentamiento de agua en el tanque de alimentación a las calderas.

Se realiza pre-calentamiento del agua de alimentación a calderas con el fin de aumentar la eficiencia del equipo ya que de esta forma necesitará menos calor para llevar el agua hasta su punto de ebullición. Este calentamiento se realiza de forma directa por medio de una flauta con orificios elaborada en acero al carbón e instalada al interior del tanque de calentamiento donde circula el vapor que viene de la caldera y se mezcla directamente con el agua de alimentación lo que impide la formación de condensado y por tanto no debe incluirse en los cálculos de recuperación de condensado.

Considerando la operación continua de la caldera 2, el cálculo se realiza para el tanque de alimentación de la misma:

La capacidad del tanque de alimentación a la caldera 2 es de 520 gal.

Por medio del factor de conversión:

$$1 m^3 = 264,18 gal$$

Por tanto:

$$520 gal * \frac{1 m^3}{264,18 gal} = 1.968 m^3$$

Conociendo que:

$$1 m^3 de agua = 1000 Kg de agua$$

$$1.968 m^3 de agua * \frac{1000 Kg de agua}{1 m^3 de agua} = 1968 Kg de agua$$

Con la siguiente formula se halla la cantidad de energía que necesita el agua para elevar su temperatura de 30 a 80 (Q):

$$Q = m Cp \Delta T = 1968 Kg * 4.14 \frac{KJ}{Kg^{\circ}C} * (80 - 30)^{\circ}C$$
$$Q = 407376 KJ$$

De la formula $Q = m_v * h_t$ se despeja m_v :

$$m_v = \frac{Q}{h_t}$$

Dónde:

$$h_t = h_{fg@80psi} + C_{p\text{ agua}}(T_{@80psi} - T_1)$$
$$h_t = 2104.72 \text{ KJ/Kg} + 4.14 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}} (153 - 80)^\circ\text{C}$$
$$h_t = 2406.94 \text{ KJ/Kg}$$

Por tanto:

$$m_v = \frac{Q}{h_t} = \frac{407376 \text{ KJ}}{2406.94 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}} = 169.25 \text{ Kg de vapor}$$

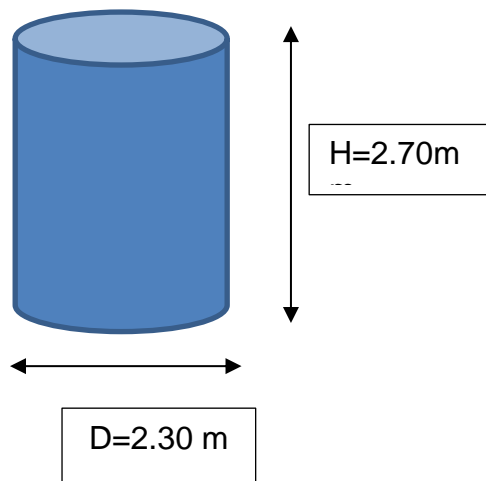
$$m_v = \frac{169.25 \text{ Kg de vapor}}{720 \text{ horas (1 mes)}}$$

$$m_v = 0.235 \text{ kg/hr}$$

2.1.5. Calculo de carga térmica para el tanque de agua 1.

A continuación, se calcula la carga térmica, término que se refiere a la cantidad de vapor requerido para calentar una masa de sustancia en específico, en este caso agua, a la temperatura requerida por el proceso.

- Para todos los tanques se considera su forma cilíndrica:



Con el fin de hallar la masa de la sustancia a calentar (m) se utiliza la fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v}; \text{ por esto:}$$

$$m = \rho * v$$

Dónde:

$$v: \text{volumen del cilindro: } v = h\pi r^2$$

$$v = h\pi r^2 = 2.70m * \pi * (1.15m)^2 = 11.2178 m^3$$

Y con la densidad del agua:

$$\rho = 1000 kg/m^3$$

Por tanto:

$$m = \rho * v = 1000 \frac{kg}{m^3} * 11.2178 m^3$$

$$m = 11217.8 kg \text{ de sustancia a calentar}$$

De acuerdo a la fórmula:

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}}$$

Teniendo en cuenta que:

$$C_{p_{agua}} = 4.14 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ C}$$

$$\Delta T = (90 - 30)^\circ C$$

$$t = 1.7 hr$$

La entalpía específica de evaporación (h_{fg}) a la presión de trabajo que es 15 psi es calculada mediante el programa de Spirax Sarco (Spirax Sarco, 2018):

Entradas	Presión	
Salida	<input checked="" type="radio"/> valor individual <input type="radio"/> tabla	
Presión	15	psi manométrico
<input type="button" value="Calcular"/> <input type="button" value="Reset"/> <input type="button" value="Imprimir"/>		
Temperatura de Saturación	120.984	°C
Entalpía Específica del Agua (h_f)	507.998	kJ/kg
Entalpía Específica de Evaporación (h_{fg})	2199.66	kJ/kg

Figura 11. Cálculo de entalpía especifica de evaporación. (Spirax Sarco, 2018)

De acuerdo a la figura 11 se tiene un valor para la entalpía específica de evaporación de $h_{fg} = 2199.66 KJ/Kg$ a 15 psi.

Reemplazamos los valores en la formula (1):

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}} = \frac{18000 \text{ kg} * 4.14 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (90 - 30)^\circ\text{C}}{1.7 \text{ hr} * 2199.66 \text{ KJ/Kg}}$$

$$m_v = 619 \text{ kg/hr}$$

El valor de $m_v = 619 \text{ kg/hr}$, representa la cantidad de vapor necesaria para calentar 11217.8 kg de agua de 30 °C a 90 °C en un tiempo aproximado de 1 hora y 42 minutos.

2.1.6. Calculo de carga térmica para el tanque de agua 2.

En este ítem se calcula la carga térmica para el tanque de agua 2. La masa de sustancia a calentar en este tanque es de 15 toneladas.

Se utilizó la siguiente fórmula para hallar la masa de vapor necesaria para calentar 15 toneladas de agua.

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}}$$

Teniendo en cuenta que:

$$C_{p_{\text{agua}}} = 4.14 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}$$

$$\Delta T = (90 - 30)^\circ\text{C}$$

$$m = 15000 \text{ kg de agua}$$

$$t = 1.7 \text{ hr}$$

La entalpía específica de evaporación (h_{fg}) a la presión de trabajo que es 15 psi al igual que en el punto anterior es:

$$h_{fg} = 2199.66 \text{ KJ/Kg}$$

Por tanto

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}} = \frac{15000 \text{ kg} * 4.14 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} * (90 - 30)^\circ\text{C}}{1.52 \text{ hr} * 2199.66 \text{ KJ/Kg}}$$

$$m_v = 929 \text{ kg/hr}$$

El valor de $m_v = 929 \text{ kg/hr}$, representa la cantidad de vapor necesaria para calentar $15\,000 \text{ kg}$ de agua de 30°C a 90°C en un tiempo aproximado de 2 horas.

2.1.7. Calculo de carga térmica para el tanque de 3.

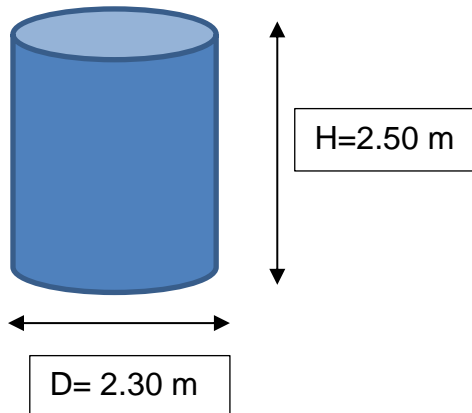
Con el fin de hallar la masa de la sustancia a calentar se utiliza la fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v}; \text{ por esto:}$$
$$m = \rho * v$$

Dónde:

$$v: \text{volumen del cilindro: } v = h\pi r^2$$

Para hallar el volumen del cilindro se muestra el siguiente diagrama de un cilindro especificando su altura (H) y diámetro (D).



Entonces:

$$v = h\pi r^2 = 2.50 \text{ m} * \pi * (1.15 \text{ m})^2 = 10.3869 \text{ m}^3$$

Y con la densidad del agua:

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Por tanto:

$$m = \rho * v = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 10.3869 \text{ m}^3$$

$$m = 10386.9 \text{ kg de sustancia a calentar}$$

De acuerdo a la formula (1)

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}}$$

Teniendo en cuenta que:

$$Cp_{agua} = 4.14 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ C}$$

$$\Delta T = (90 - 30)^\circ C$$

$$t = 1.3 \text{ hr}$$

La entalpía específica de evaporación (h_{fg}) a la presión de trabajo 15 *psi* es
 $h_{fg} = 2199.66 \text{ KJ/Kg}$

Reemplazando:

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}} = \frac{18\,000 \text{ kg} * 4.14 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ C} * (90 - 30)^\circ C}{1.7 \text{ hr} * 2199.66 \text{ KJ/Kg}}$$

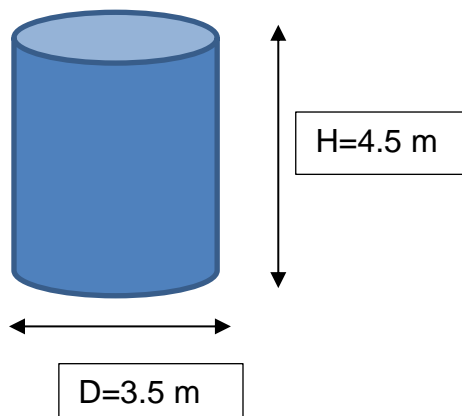
$$m_v = 1114 \text{ kg/hr}$$

El valor de $m_v = 1114 \text{ kg/hr}$, representa la cantidad de vapor necesaria para calentar 18 000 *kg* de agua de 30 °C a 90 °C en un tiempo aproximado de 2 horas.

2.1.8. Calculo de carga térmica para cada uno de los cuatro (4) tanques de solución oxidante

Se calcula la carga térmica de los tanques de solución oxidante, teniendo en cuenta que todos los tanques tienen las mismas medidas, se realiza para un tanque.

- Para todos los tanques se supone una forma cilíndrica:



Con el fin de hallar la masa de la sustancia a calentar se utiliza la fórmula:

$$\rho = \frac{m}{v}; \text{ por esto:}$$

$$m = \rho * v$$

Dónde:

$$v: \text{volumen del cilindro: } v = h\pi r^2$$

$$v = h\pi r^2 = 4.5m * \pi * (3.5m)^2 = 173.18 m^3$$

Y con la densidad de la Solución Oxidante:

$$\rho = 1.35gr/mL$$

Ya que se requiere la masa de la sustancia a calentar en Kg:

$$\rho = \frac{1.35gr}{mL} * \frac{1000mL}{1000gr} * \frac{1Kg}{1 m^3} = 1.35 \frac{Kg}{m^3}$$

Por tanto:

$$m = \rho * v = 1.35 \frac{Kg}{m^3} * 173.18 m^3 = 233793,398 Kg$$

De acuerdo a la fórmula:

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}}$$

Teniendo en cuenta que:

$$C_{p_{Sol.Oxidante}} = 2.12 \frac{KJ}{Kg ^\circ C}$$

$$\Delta T = (80 - 40)^\circ C$$

$$m = 233793,398 kg \text{ de Solución Oxidante}$$

$$t = 2.5 hr$$

La entalpía específica de evaporación (h_{fg}) a la presión de trabajo que es 15 psi al igual que en el punto anterior es:

$$h_{fg} = 2199.66 KJ/Kg$$

Por tanto:

$$m_v = \frac{m C_p \Delta T}{t h_{fg}} = \frac{233793,398 Kg * 2.12 \frac{KJ}{Kg ^\circ C} * (80 - 40)^\circ C}{1.5 hr * 2199.66 KJ/Kg}$$

$$m_v = 964 kg/hr$$

Como los tanques presentan la misma geometría, el total de la masa de vapor requerida por este subproceso es:

$$m_T = \left(964 \frac{kg}{hr}\right) * 4 = 3856 \frac{kg}{hr} \text{ de vapor}$$

En la Figura 15, se muestra un esquema del sistema de generación y distribución de vapor de la planta emulsión evidenciando las cargas térmicas anteriormente calculadas, requeridas por cada uno de los procesos de calentamiento.

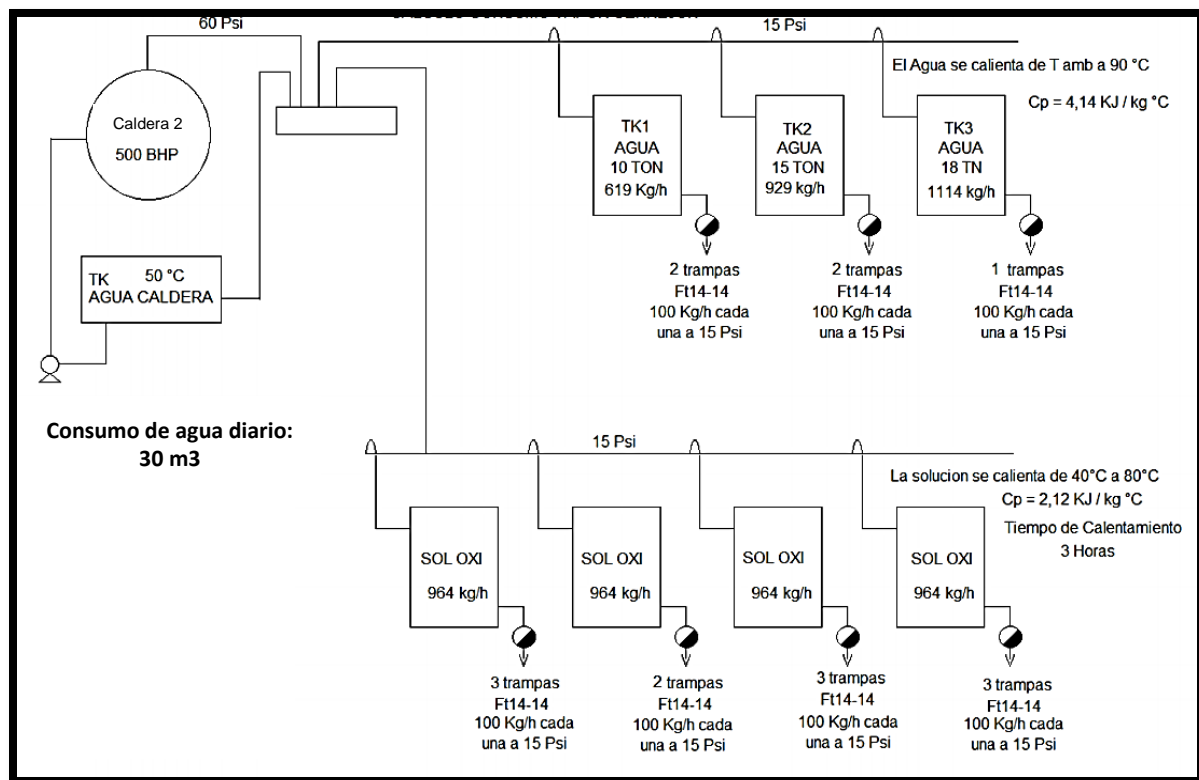


Figura 12. Esquema del sistema de generación de vapor.

De acuerdo a los cálculos realizados, la carga térmica total requerida por el proceso de producción, es decir, la cantidad de vapor necesaria es de $6518 \frac{kg}{hr}$ de vapor. Debido a que la capacidad máxima de producción de vapor del sistema de generación de la planta de emulsión es de $12519.14 \frac{kg}{hr}$ de vapor el requerimiento energético está cubierto y por el contrario

estando en funcionamiento solamente la caldera 2 (500BHP) con una producción de 7814 Kg/hr de vapor es suficiente para suplir el consumo de vapor de la planta.

2.1.9. *Calculo de gas requerido recuperando condensado y emisiones de CO₂ .*

Se desarrolló la siguiente malla en Excel recopilando los datos necesarios para el consumo de gas.

DATOS DE GENERACION		
TIPO DE COMBUSTIBLE	Gas	
PODER CALORICO	37800	KJ/m3
COSTO DE COMBUSTIBLE	\$ 870	COP\$/M3
	\$ 23.016	COP\$/GJ
TIEMPO DE OPERACIÓN DE LA PLANTA	8640	h/AÑO
COSTO AGUA CRUDA (ACUEDUCTO O POZO)	\$ 3.360	COP\$/M3
COSTO DE AGUA TRATADA	\$7.034,31	COP\$/M3
COSTO POR EFLUENTES	\$ 0	COP\$/M3
COSTO ENERGIA ELECTRICA	----	COP\$/kwh
TEMPERATURA ENTRADA AGUA MAKE - UP	30	°C
TEMPERATURA ACTUAL AGUA DE ALIMENTACION	50	°C
EFICIENCIA DE LA CALDERA	85	%

DATOS CONSUMOS AÑO 2017		
CONSUMO DE ENERGIA TERMICA	42638,85	GJ/AÑO
CONSUMO DE COMBUSTIBLE ANUAL	1128012	M3/AÑO
CONSUMO DE AGUA ANUAL	23424	M3/AÑO
EMISIONES DE CO2 POR CONSUMO ENERGIA TERMICA	2518	TON/AÑO

Figura 13. Datos de generación de vapor de la planta de emulsión.

Teniendo en cuenta de la figura 18 que el poder calorífico del gas es 37.800 KJ/ m³ y con el valor promedio mensual de consumo, se calcula en consumo de energía térmica anual:

$$1.128.012 \frac{m^3}{año} * 37.800 \frac{KJ}{m^3} * \frac{1GJ}{1.000.000kJ} = 42.638,85 GJ/año$$

Lo cual produce la siguiente cantidad de emisiones de CO₂:

Teniendo en cuenta que el factor de emisión del gas natural es 59,06 Kg CO₂/GJ

$$42.638,85 \frac{GJ}{año} * 59,06 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{GJ} * \frac{1 \text{ ton de } CO_2}{1000 Kg \text{ de } CO_2} = 2518 \frac{\text{ton de } CO_2}{año}$$

Ahora recuperando el condensado que se genera a 70°C actualmente se requeriría el consumo térmico calculado a continuación.

$$\dot{Q} = \frac{m C_p \Delta T}{t} = \frac{22300 Kg}{hr} * 4.14 \frac{KJ}{Kg \text{ } ^\circ C} * (70 - 30)^\circ C$$

$$\dot{Q} = \frac{3.692.880 KJ}{hr} * \frac{1 GJ}{1.000.000 KJ} * \frac{8640 hr}{1 año} = 31.906 GJ/año$$

Teniendo en cuenta que el factor de emisión del gas natural es 59,06 Kg CO₂/GJ

$$31.906 \frac{GJ}{año} * 59,06 \frac{Kg \text{ de } CO_2}{GJ} * \frac{1 \text{ ton de } CO_2}{1000 Kg \text{ de } CO_2} = 1884,3 \frac{\text{ton de } CO_2}{año}$$

Por lo tanto, con la recuperación del condensado se obtiene una reducción del 25% en el consumo de gas natural y en las emisiones de CO₂ como se observa pasando de 42.638,85 GJ/año a 31.906 GJ/año y de 2518 ton de CO₂/año a 1884,3 ton de CO₂/año respectivamente..

2.1.10. Pérdidas de vapor por fugas.

Se estiman las perdidas por fugas de vapor de acuerdo a la medición del diámetro del orificio de la fuga y la presión de trabajo en bares, se utiliza la gráfica expuesta en la figura 13.

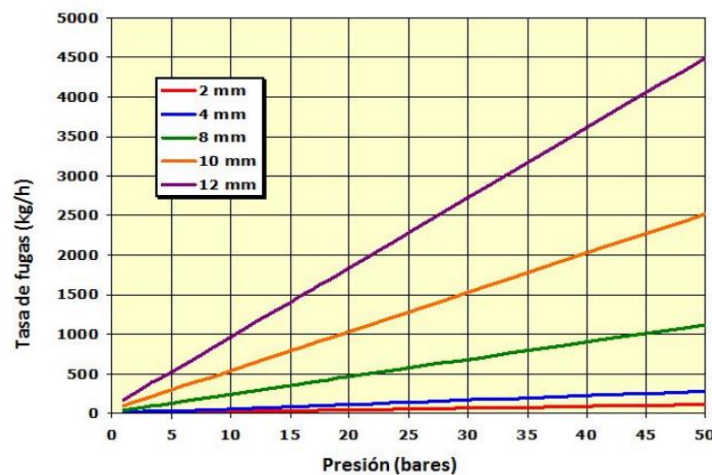


Figura 14. Pérdidas de vapor por fugas.

Se encontraron dos fugas con 4 y 8 mm de diámetro representadas en las líneas azul y verde respectivamente a una presión de trabajo de 14 bar arroja unas perdidas aproximadas de vapor de 100 y 250kg/hr. Estas fugas fueron corregidas 2 días después de detectadas debido a condiciones de seguridad.

2.2. Producción de condensado.

En esta sección se calculará la producción de condensado actual de la planta de emulsión y se obtiene un estimado del ahorro de agua potable, así mismo el de los químicos que se utilizan para su tratamiento, previo a la alimentación en las calderas.

Teniendo en cuenta que se consumen $30 \frac{m^3}{dia}$ de agua potable y que $1m^3 de agua = 1000 Kg de agua$.

Por lo tanto:

$$30 \frac{m^3}{dia} * \frac{1000 Kg de agua}{1m^3 de agua} = 30000 kg de agua/dia$$

$$30000 \frac{kg de agua}{dia} * \frac{1 dia}{24 horas} = 1250.33 kg/hr$$

En un proceso con un 100% de eficiencia la cantidad de agua potable consumida en el proceso sería igual a la cantidad de condensado a recuperar, pero se deben considerar las pérdidas de calor por fugas, conducción, convección y radiación. Por lo anterior el equipo desarrollador ha considerado una recuperación de condensado conservadora del 80% de la cantidad total de condensado para un valor de $1000 \frac{kg}{hr}$ de agua a recuperar.

2.2.1. Caracterización de condensado.

Con el objetivo de recuperar agua de alta calidad (**Condensado**) y teniendo en cuenta que está se planea reincorporar al proceso de generación de vapor y por consiguiente no debe causar daños a los equipos, se acogerán los límites y parámetros establecidos por los estándares técnicos internacionales para el agua de alimentación a las calderas: Norma Británica BS – 2486 de la ABMA (American Boiler Manufacturing Association) como punto de partida desde el punto de vista químico y legislativo.

Además, los diseños y evaluaciones propuestos en este documento siguen las directrices de la bibliografía desarrollada por la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME).

Para realizar la caracterización se identificaron las condiciones actuales que tiene el condensado por medio de la medición de los parámetros obtenidos del proceso de generación y distribución de vapor en la planta de emulsión. El proceso consistió en la toma de 18 muestras por un periodo de tres (3) meses en diferentes fechas y puntos del sistema de distribución de vapor en la planta con el objetivo de identificar qué parámetros se encontraban fuera de rango según la Norma Británica BS – 2486 que estipula los parámetros y límites permisibles para el agua de alimentación a las calderas.

- **Análisis de resultados obtenidos:**

En la tabla 4 se observa que la muestra analizada en noviembre 10 de 2017 tiene una concentración alta de nitratos y como consecuencia un nivel de conductividad por encima del permitido, debido a una fuga dentro del proceso de calentamiento. Luego de una intervención de mantenimiento se logra disminuir estos valores como se puede apreciar en la muestra tomada el 31 de enero de 2018 donde la conductividad y la concentración de nitratos disminuyen considerablemente, siendo ahora la concentración de nitratos de 95,6 mg/L NO_3^- en comparación a los 22.869 mg/L NO_3^- iniciales. Con esto se reafirma la necesidad de tener un control respecto a la calidad de agua que se planea reincorporar, por lo tanto, ese requiere contar con un sistema de detección de contaminación en el agua a recuperar, el cual permita la evacuación inmediata del condensado contaminado evitando la llegada del mismo a las calderas.

Tabla 4. Caracterización de condensados de planta de emulsión.

PARÁMETRO	UNIDADES	MÉTODO	Condensados TK # 4 Noviembre- 10-2017	Condensado TK 4 Enero -31 - 2018	Norma BS 2486 para agua de alimentación a las calderas.
Alcalinidad T	mg/L	Titulación con H_2SO_4	5.8	3.2	<700
Conductividad	mg/L	Electrométrico	22869	95.6	<7000
Ortofosfato	mg/L	Ácido Ascórbico	0.09	0.21	<60
Nitratos	mg/L	Red. Cadmio- Colorimetría	1164.2	6.7	<50
Nitritos	mg/L	Diazotización- Colorimetría.	0.518	0.005	-
pH	Adimensional	Potenciométrico	5.92	6.00	10.5-11.8
Sulfatos	mg/L	Turbidimétrico	0	0	<70
Temperatura	°C	Termométrico	20.22	20.3	-
Hierro	mg/L	Absorción	1.603	0.005	<3.0
Sólidos	mg/L	Gravimétrico	10585	40	<3500
Sólidos suspendidos	mg/L	Gravimétrico	10.6	1	<200

2.2.2. Evaluación del sistema de drenado de condensado.

De acuerdo con el Instituto de Control de Fluidos, un sistema de drenado de condensado llamado **trampa de vapor** es una válvula de autocontención que automáticamente drena condensado desde un recinto que contiene vapor y una vez drenado el condensado se mantiene hermética al vapor. Las trampas de vapor establecen el límite entre el vapor y el condensado, por lo tanto, si existen fallas en su operación se tendrá como resultado escape de vapor, existiendo, por consiguiente, pérdida de energía y a su vez pérdidas económicas (Palacios et al., 2015).

Existen cuatro métodos de inspección a las trampas de vapor: visual, electrónico, térmico y acústico (Palacios et al., 2015). Se utilizó el método visual

ya que este se fundamenta en la observación de la descarga de las trampas de vapor a la atmosfera, es decir, cuando no existe recuperación de condensado, como es el caso actual en la planta. Se debe reconocer la diferencia entre vapor flash o revaporizado, que es característico en el funcionamiento de trampas, y vapor vivo, presente este último cuando la trampa falla en posición abierta. La diferencia entre vapor vivo y vapor flash se aprecia en la Figura 18. A la derecha se encuentra la descarga de vapor vivo (trampa totalmente abierta) y a la izquierda vapor revaporizado (**trampa operando con normalidad**). (Palacios et al., 2015)



Poner 18ª.18b

Figura 15. Descarga de trampa de vapor. (Issue, 2002)

Así mismo a través del método visual (Issue, 2002) se inspeccionaron las tuberías, accesorios, y equipos del sistema de generación y distribución de vapor. Por medio del método visual se observa correcto funcionamiento de acuerdo a lo expresado anteriormente de las trampas instaladas, sin embargo, se evidenciaron fugas del producto a calentar (Solución Oxidante) que contaminan el condensado, por esta razón, se realizó una caracterización que se explica en el numeral 2.3.2 de este capítulo.

Por otro lado, con el objetivo evaluar la capacidad de evacuar condensado de las trampas de vapor instaladas actualmente se inspeccionó el área de generación y distribución de vapor, encontrando que las trampas de vapor utilizadas son de tipo de purgadores de boya cerrada para vapor FT 14 de 3/4 como se observa en la figura 15 para una presión de trabajo de 14 bar (15 psi).

En la ficha técnica se indica mediante un gráfico la capacidad de condensado que puede desalojar cada trampa la cual es la gráfica señalada en la figura 16.



Figura 16. Trampas de vapor instaladas actualmente.

La presión de trabajo de las calderas es 15 *psi*. Para utilizar la gráfica, aplicaremos el factor de conversión de 1 *psi* = 0.06895 bar, por tanto:

$$\text{Presión de trabajo} = 15 \text{ psi} \frac{0.06895 \text{ bar}}{1 \text{ psi}} = 1,03425 \text{ bar}$$

$$\text{Presión diferencial} = \text{Presión de trabajo} - \text{Presión de descarga}$$

La presión de descarga es 0 debido a que la descarga es atmosférica. Entonces, la presión diferencial es 1,03425 bar.

Luego del cálculo de la presión diferencial se ubica la primera diagonal concerniente a 14 bar y a un diámetro de tubería de ¾", y se cruza con el valor para la presión diferencial que es de 1,03 bar en el eje X. Este es el punto que relaciona las trampas instaladas actualmente, luego se traza una horizontal que cruce al eje Y, en este punto en la figura 20 se halla el valor para la capacidad de desalojo de condensado que tiene la trampa. Para este caso puntual, las trampas instaladas en el sistema de distribución de vapor pueden desalojar **100 kg/hr** cada una.

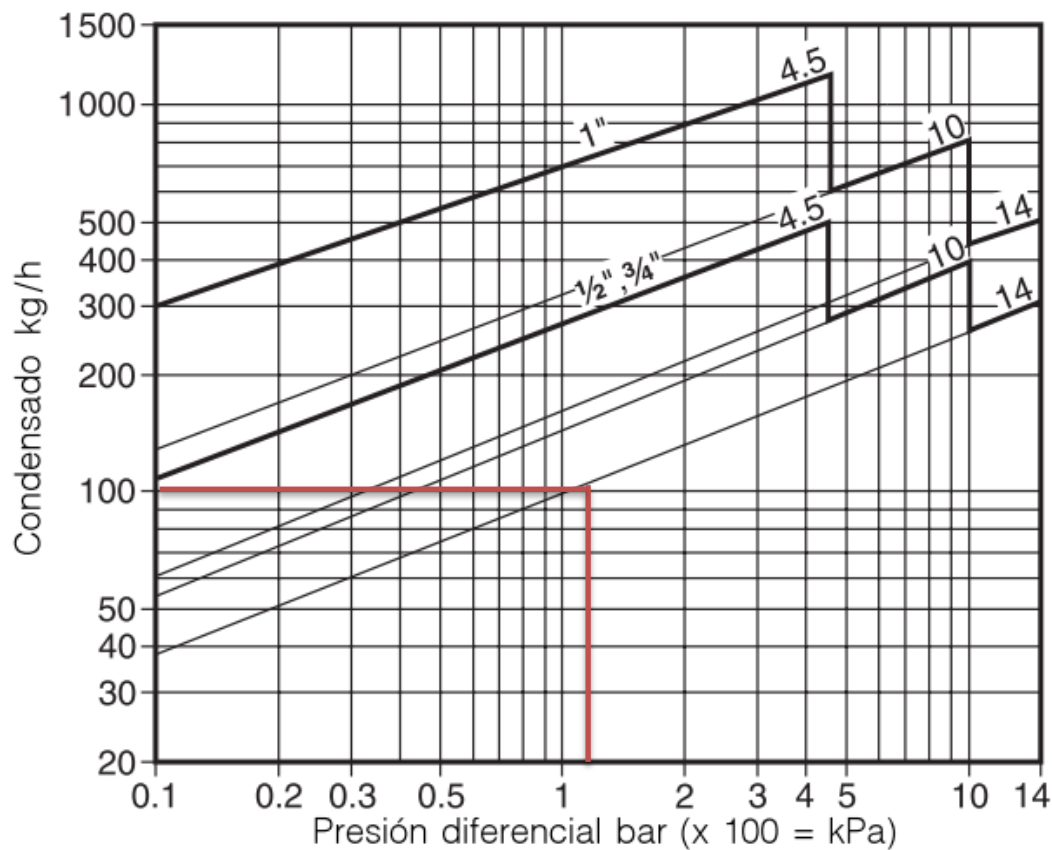


Figura 17. Gráfica de capacidad de condensado. (Spirax Sarco, 2002)

La carga térmica es una medida fiable en la escogencia de las trampas de vapor adecuadas para el desalojo del condensado que se genera evitando inconvenientes al proceso de recolección del mismo.

Teniendo en cuenta la figura 15, la carga térmica requerida por cada tanque es igual a la cantidad de condensado que deben desalojar las trampas instaladas en cada uno de ellos, se puede observar que en todos los tanques hay un déficit en el desalojo de condensado como lo muestra la figura 21.

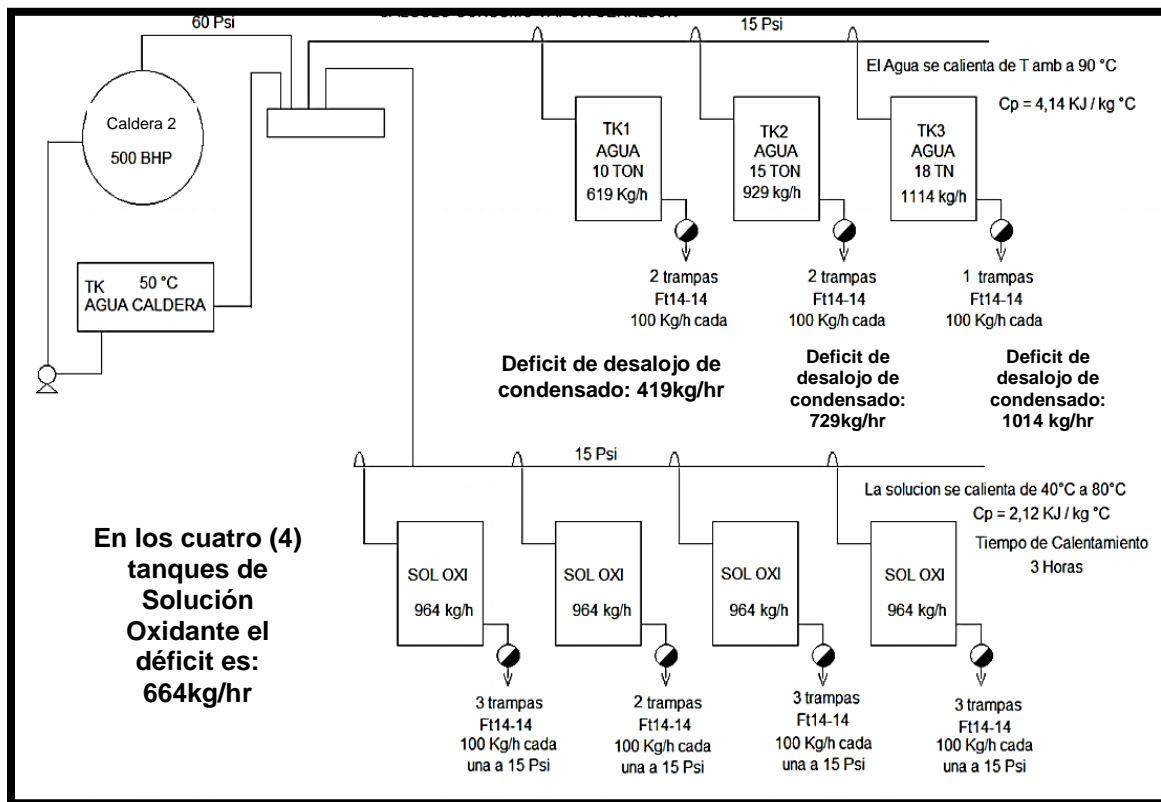


Figura 18. Déficit de desalojo de condensado.

Por lo tanto, las trampas de vapor instaladas en las líneas de distribución de cada tanque donde se produce condensado están evacuando menos condensado del que teóricamente deberían debido al diámetro de la tubería actual.

2.2.3. Requerimientos de sistema de drenado de condensado.

Los requerimientos para definir el sistema de drenado de condensado (Trampas de vapor) se basan en las condiciones del sistema que son la presión, la temperatura, la capacidad de descarga, el material y tipo de conexión como se muestra en la figura 22. Se debe tener en cuenta que las trampas de vapor son el primer contacto con el condensado que se desea recuperar.

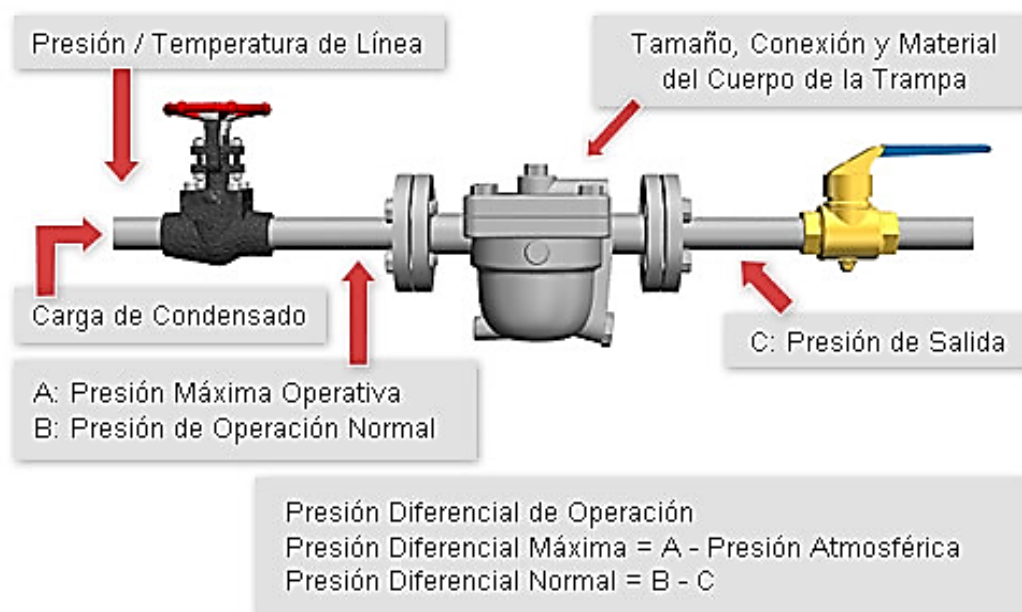


Figura 19. Tubería Instalada y Conexiones de Tubería.

La tubería instalada determina el tipo de conexión y el material del cuerpo de la trampa. Por lo que es importante asegurarse que la trampa cumple estos requerimientos. Por ejemplo, una trampa puede tener conexión estándar NPT (National Pipe Thread), pero el rating de la tubería requiere conexión soldable SW.

La capacidad de descarga debe ser adecuada para la carga máxima de condensado a la mínima presión diferencial y bajo todas las condiciones climáticas. (Teoría del Vapor: TLV, 2017)

Actualmente, las condiciones de la operación en la planta de emulsión son: una presión de descarga de 15 psi y una presión de succión de 14,7 psi (una atmósfera). Además, se encuentran trampas FT 14-10 de ¾.

Las trampas adecuadas para el proceso son FT-14-14 de 1" debido a que estas trabajan a una presión de 14 bar (15 psi) que es la presión de operación del sistema y con un diámetro mayor supe la carga de condensado que desaloja el tanque.

2.2.4. Sistema de detección de condensado contaminado (SDCC)

Se definió como requerimiento para el diseño la necesidad de un sistema de detección de agua contaminada en la salida de cada tanque de Solución Oxidante como factor clave, con el fin de no acortar la vida útil de las calderas al introducir químicos perjudiciales para la misma, basados en la caracterización realizada al condensado.

Si el nivel de conductividad se eleva por encima del punto preseleccionado, debido a una fuga en algunos de los tanques de Solución Oxidante, la línea de retorno de condensado es cerrada y una válvula de descarga en la línea principal es abierta, permitiendo al condensado fluir al drenaje, preferiblemente a través de un tanque de purga. Cuando la conductividad disminuye, la válvula de descarga es cerrada y el condensado puede retornar al sistema de alimentación de agua a las calderas, de esta forma se minimizan las pérdidas de calor y agua y se evita la posibilidad de contaminación del agua de alimentación. (Spirax Sarco)

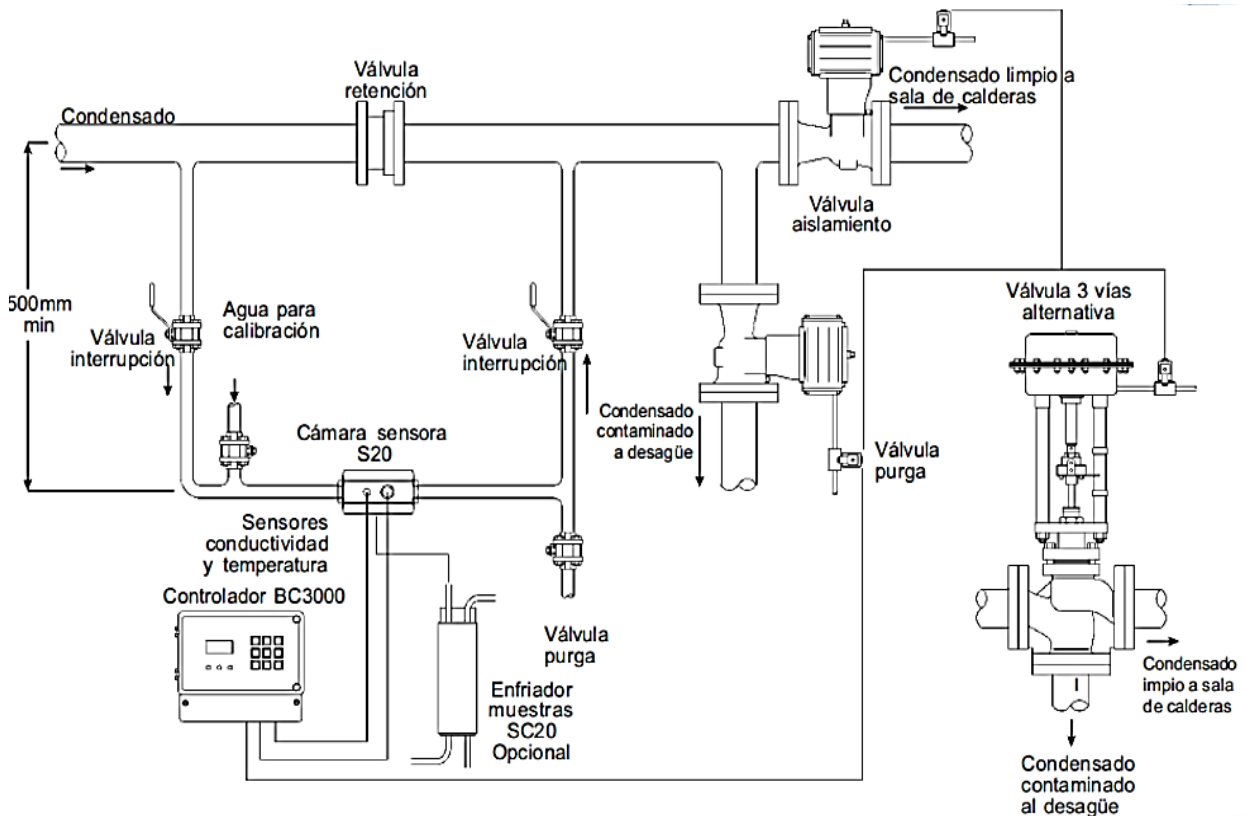


Figura 20. Sistema de detección de condensado contaminado.

2.2.5. Ciclo del agua.

El ciclo del agua que se recuperará está basado en dos aspectos esenciales, el primero es el cumplimiento de la Norma BS 2486 anteriormente expuesta, que regula los parámetros y límites permitidos para el ingreso de agua a las calderas y segundo, para el presente caso de estudio, es el grado de contaminación del agua con nitrato de amonio, el cual será controlado mediante un Sistema de Detección de Condensado Contaminado (SDCC) basado en la conductividad del agua, ya que al aumentar la presencia de iones nitrato (NO_3^-) debido a la contaminación con nitrato de amonio (NH_4NO_3) en la muestra, a su vez aumenta la conductividad de la misma. En conclusión, el ciclo del agua empieza con su captación de la red de agua potable, luego se introduce en las calderas donde se calienta hasta lograr su evaporación, después el vapor producido al ser utilizado dentro del proceso se transforma en agua líquida (condensado) y este luego de pasar por el sistema de detección de condensado contaminado y si se encuentra apto vuelve a introducirse en las calderas como se muestra en la figura 24.

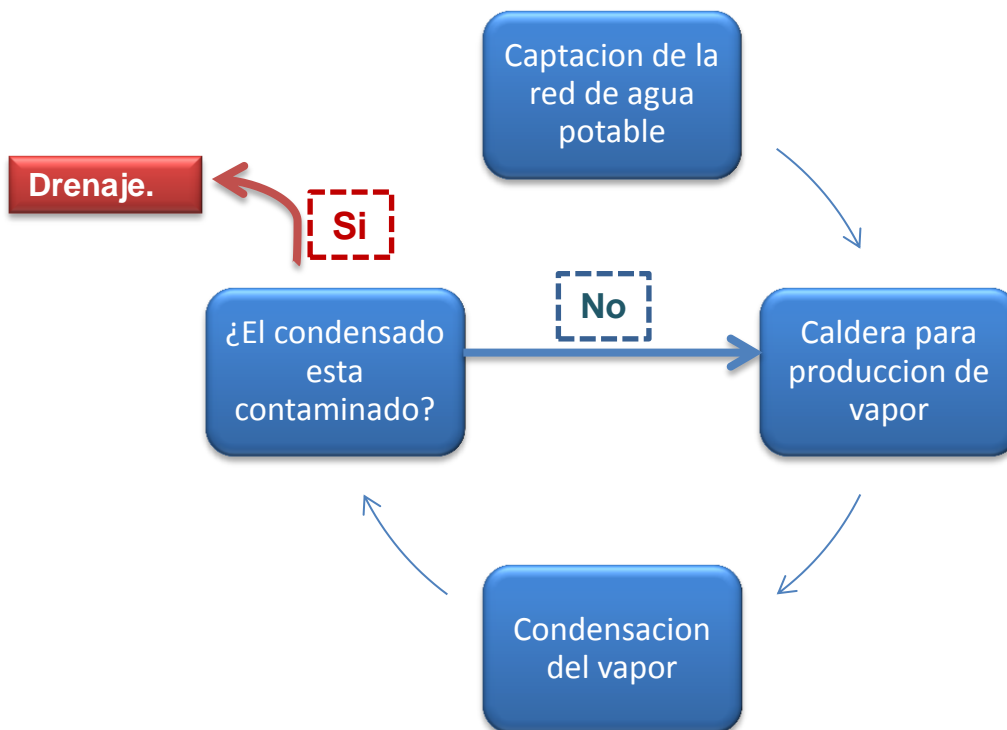


Figura 21. Ciclo del agua.

Es importante recordar que el agua utilizada en la generación de vapor solo cambia de estado, esta no sufre otro tipo de alteraciones, por esto puede ser reincorporada al mismo proceso sin inconvenientes, aprovechando su temperatura y características óptimas para el retorno.

2.3. Área disponible para la instalación del sistema.

Se dispone con un área de 2.82 m² ubicada estratégicamente entre la zona de calderas y la zona de calentamiento o distribución del vapor, como se muestra en la figura 25, lo que hace de este lugar el ideal para colocar el sistema de recuperación de condensado.



Figura 22. Espacio disponible para el sistema de recuperación de condensados.

3. Etapa 3: Definición de alternativas de solución.

En la siguiente etapa se exponen dos soluciones encontradas en el mercado para la recuperación de condensados, luego por medio de una matriz de evaluación se escoge la mejor alternativa de solución a la luz de los criterios y ponderación, definidos por el equipo desarrollador del proyecto, el Supervisor de la planta de emulsión y la ingeniera química de la planta.

3.1. Descripción de los sistemas.

Existen dos soluciones en el mercado para el diseño de un sistema de recuperación de condensados eficiente, ajustados a las necesidades de la planta de emulsión estudiada, uno de ellos consta de un tanque en donde se recolectan los condensados y una bomba de accionamiento por vapor, por el contrario, el otro consiste en un equipo que actúa como bomba o trampa dependiendo de las condiciones de operación.

3.1.1. Propuesta 1. Sistema Tanque-Bomba.

El sistema apreciado en la Figura 23 corresponde a un diseño conceptual de un tanque de recolección de condensado y una bomba de accionamiento por vapor, la cual resulta ser una buena opción para eliminar el condensado ya que la fuerza de accionamiento es menos costosa la energía que requiere una bomba centrífuga eléctrica. (Spirax Sarco, 2017)

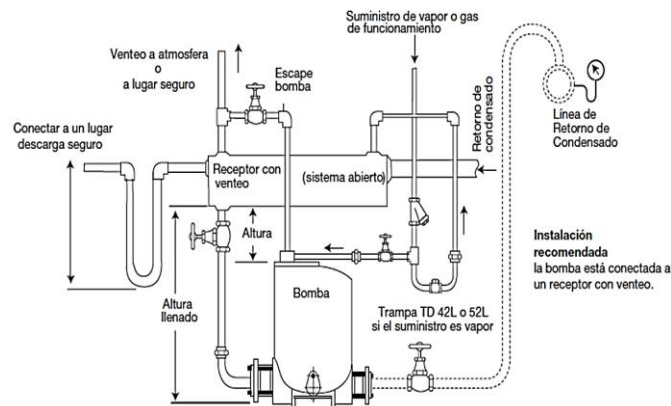


Figura 23. Diseño conceptual Tanque-Bomba.

El uso de sistemas de bombeo de condensado esta propuesta, permite que el condensado y el vapor vivo (de fugas) sea separado en el tanque colector de condensado. Este vapor flash (o vivo) es aliviado a la atmósfera, y el condensado caliente residual es bombeado posteriormente al tanque de agua de alimentación de la caldera.

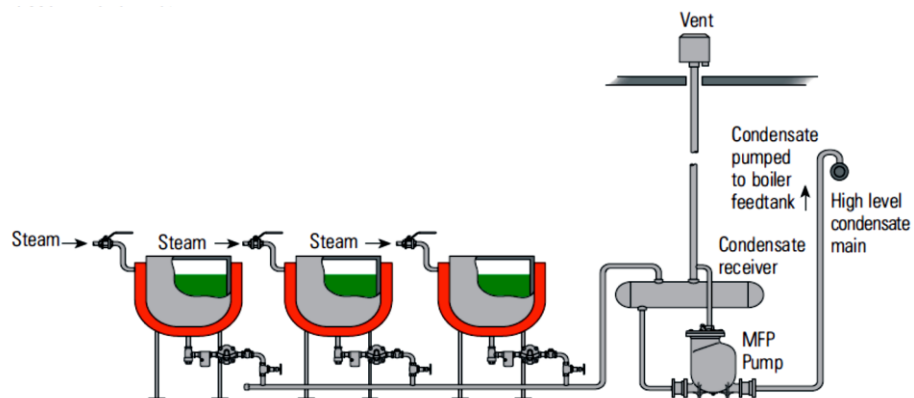


Figura 24. Sistema de bombeo.

El sistema de bombeo de la propuesta seleccionada más que almacenar el condensado, facilita la separación del vapor flash del condensado y su rápido bombeo a la caldera como se muestra en la figura 25.

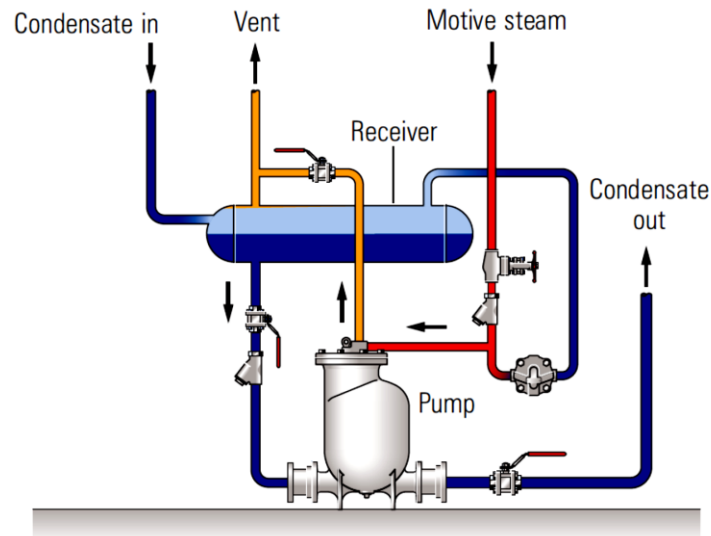


Figura 25. Propuesta Tanque - Bomba.

El sistema consta de un tanque reservorio, la bomba y un juego de válvulas cheque que facilita la operación por ciclos de la bomba, cuando es motivada con el mismo vapor.



Figura 26. Vista Isométrica propuesta uno (1) tanque-bomba.

Características del sistema

- Compatibilidad con el sistema de generación de vapor actual de la planta
- Fácil operación.
- Instalación sencilla.
- Reducción del 80% en el consumo de agua potable.
- Reducción del 25% en las emisiones de dióxido de carbono.
- Reducción del 25% en consumo de gas natural.
- Cuatro sistemas de detección de agua contaminada. (Tanques de Solución Oxidante)
- Dos puntos de acopio de condensados, uno para los tanques de agua y uno para los tanques de solución oxidante.
- No hay problemas de cavitación.
- No se deben realizar acometidas eléctricas.
- Bomba automática con accionamiento de vapor.
- Es ideal para sistemas donde se trabaje con presiones bajas.
- Funcionamiento continuo.

3.1.2. Propuesta 2. Trampa-Bomba

Es un equipo actúa como trampa de vapor o como bomba en caso de ser necesario, dependiendo de las condiciones de presión del sistema de generación de vapor.

- Sistema hermético.
- Elimina punto de acopio común de colección de condensados.
- Reducción del 80% en el consumo de agua potable.
- Reducción del 25% en las emisiones de dióxido de carbono.
- Reducción del 25% en consumo de gas natural.
- Cuatro Sistemas de detección de agua contaminada.
- Opera bajo cualquier condición de presión.
- Previene daños en el intercambiador de calor por golpe de ariete.
- Funcionamiento continuo.
- Se hace necesaria la modificación parcial de la infraestructura para la instalación del sistema.



Figura 27. Trampa – bomba

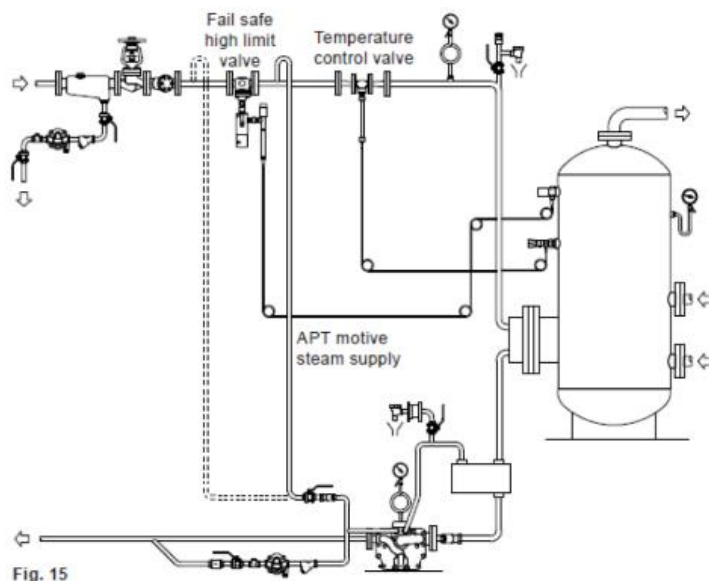


Figura 28. Esquema sistema Trampa-Bomba.

3.2. Criterios de selección y matriz de evaluación.

En esta sección se exponen las propuestas que se evaluarán a la luz de los siguientes cinco aspectos: técnico, ambiental, económico, de acuerdo al respaldo y reputación del proveedor y por último el tiempo de implementación.

Con la distribución porcentual propuesta por el equipo desarrollador del proyecto, el Supervisor de la planta de emulsión, la Ingeniera Química de la planta, se dio un peso importante al componente técnico conociendo de antemano que es un proceso que requiere de especial cuidado y atención debido a los costos de los equipos que se involucran.

Criterio de evaluación/ Calificación	Descripción del criterio de evaluación	1	2	3	4	5
(40%) Componente técnico: contempla la evaluación de las características de operatividad y mantenimiento del equipo.						
Porcentaje de recuperación de condensado	Porcentaje óptimo esperado de recuperación de agua potable.	0 -10%	10-30%	30-50%	50-70%	70-100%
¿Funciona con vapor?	Se requiere que el sistema funcione con vapor con el fin de facilitar su instalación y su funcionamiento.	No	NA	NA	NA	Si
¿Funciona continuamente?	Por la operación continua de la planta se requiere que el sistema de recuperación de condensado a su vez funcione cada vez que se requiera durante las 24 horas del día.	No	NA	NA	NA	Si
¿Es compatible con el sistema de distribución actual de la planta?	Se requiere que se acople al sistema de distribución actual con el fin de generar el menor impacto en la operación de la planta.	No	NA	NA	NA	Si
(25%) Componente ambiental: contempla la evaluación de parámetros que interactúan y pueden generar impactos al ambiente.						
Reducción de consumo de gas.	De acuerdo al porcentaje óptimo esperado de reducción en el consumo de gas.	0 -5%	5-10%	10-15%	15-20%	20-30%
Reducción de emisiones de dióxido de carbono.	De acuerdo al porcentaje óptimo esperado de reducción en las emisiones de dióxido de carbono.	0 -5%	5-10%	10-15%	15-20%	20-30%
Calidad de agua recuperada.	Contar con un sistema de detección de condensado contaminado que asegure la calidad del agua que ingresa a las calderas.	No	NA	NA	NA	Si

(15%) Componente económico: se refiere a los costos de las propuestas asociados a la puesta en marcha y operatividad del sistema.						
Costo de la instalación	Contempla los costos relacionados a mano de obra, acople al sistema de distribución de vapor.	50-60M	40-50M	30-40M	20-30M	0-20M
Costo de los equipos.	Contempla los costos del equipo y transporte del mismo hasta la planta de emulsión.	160-200M	120-160M	90-120M	60-90M	0-60M
Costo del mantenimiento.	Contempla los costos relacionados con la movilización del personal de mantenimiento y los repuestos.	160-200M	120-160M	90-120M	60-90M	0-60M
(10%) Respaldo/reputación del proveedor: comprende la disponibilidad en cuanto a los repuestos y servicios que sean requeridos luego de la instalación del sistema por parte del proveedor.						
Soporte por fallas en el sistema ajenas al equipo.	El proveedor o el departamento de mantenimiento brindan soporte por fallas ajenas al equipo.	No	NA	NA	NA	Si
Disponibilidad de repuestos.	El proveedor cuenta con los repuestos disponibles inmediatamente en caso de ser solicitados.	No	NA	NA	NA	Si
(10%) Tiempo de implementación: contempla los tiempos establecidos para la ejecución de obras relacionadas con fabricación, traslado, instalación y puesta en marcha de los equipos que hacen parte del sistema.						
Tiempo de ejecución de las obras requeridas para la instalación.	Tiempo estipulado por el proveedor para el traslado y montaje de los equipos relacionados con el sistema.	7-10meses	5-7meses	3-5meses	3-1meses	0-1mes
Fabricación inmediata	Los equipos se encuentran disponibles o se fabrican a partir de la orden de compra.	7-10meses	5-7meses	3-5meses	3-1meses	0-1mes

3.3. Comparación ponderada

Califique de 1 a 5, donde 1 es el valor más negativo y 5 el valor más positivo en relación a los criterios establecidos en el numeral 3.2 de este capítulo para cada propuesta presentada.

Tabla 5. Comparación ponderada.

CRITERIO	PORCENTAJES (%)	PROPUESTA 1 TANQUE-BOMBA	PROPUESTA 2 TRAMPA-BOMBA
(40%) COMPONENTE TÉCNICO			
Porcentaje de recuperación de condensado	10	5	5
¿Funciona con vapor?	10	5	5
Funcionamiento continuo. (24 horas).	10	5	5
¿Es compatible con el sistema de distribución actual de la planta	10	5	2
(25%) COMPONENTE AMBIENTAL			
Reducción de consumo de gas.	10	5	5
Reducción de emisiones de dióxido de carbono.	5	5	5
Calidad de agua recuperada.	10	5	5
(15%) COMPONENTE ECONÓMICO			
Costo de la instalación	5	3	1
Costo de los equipos	5	3	2
Costo del mantenimiento	5	5	4
(10%) RESPALDO/REPUTACIÓN			
Soporte por fallas en el sistema ajenas al equipo	5	5	5
Disponibilidad de repuestos	5	5	5
(10%) TIEMPO DE IMPLEMENTACIÓN			
Tiempo de ejecución de las obras requeridas para la instalación	5	5	3
Fabricación inmediata	5	5	5
TOTAL		4.8	4.1

La propuesta que obtuvo una mejor calificación a la luz de los criterios establecidos por los involucrados en el proyecto es la 1 correspondiente a un sistema acoplado **Tanque – Bomba** con una puntuación de **4.8** de **5.0**. Esta propuesta es la que mejor se acopla a las necesidades de la planta de emulsión, debido a que para su instalación no se hacen necesarios cambios relacionados con la infraestructura. Además, proporciona los parámetros de calidad requeridos por las calderas para su correcto funcionamiento con un costo asociado menor al de la propuesta 2.

CAPITULO IV. VALIDACION DEL SISTEMA DE RECUPERACION DE CONDENSADOS.

En este capítulo se desarrolla la etapa metodológica 4 a través de la aplicación de validaciones al sistema de recuperación de condensados, para las cuales se utilizaron dos programas especializados de simulación de procesos químicos (**Aspen Hysys y Steam System Modeler Tool**) que permiten comprobar si es viable la recuperación de condensados en la planta de emulsión. Además, se analizan los consumos históricos de agua potable, se establecen los ahorros asociados a la recuperación de condensado y se expone el impacto ambiental que se evidenciara una vez ejecutado el proyecto.

1. Etapa 4: Validación del sistema de recuperación de condensado.

En esta etapa se realizan simulaciones del sistema de generación y distribución de vapor actual para conocer cómo reaccionaría con la introducción de recuperación de condensados al proceso y los valores aproximados de las variables principales del proceso (Presión y temperatura).

1.1. Simulaciones

Se realiza una simulación del sistema ingresando los datos reales de operación como presión y temperatura del vapor que se produce en la caldera 2 (500BHP), así mismo, flujos agua consumidos en la generación de vapor en la planta de emulsión. A continuación, se muestran las validaciones con cada simulador.

1.1.1. Aspen Hysys V.8.8.

Aspen HYSYS (o simplemente HYSYS) es un simulador de procesos químicos utilizado para modelar matemáticamente, desde operaciones unitarias hasta plantas químicas completas y refinerías. En este caso se simulo el sistema de generación y distribución de vapor con recuperación de condensado como se muestra en la figura 31.

- Simulación del sistema actual con recuperación de condensado

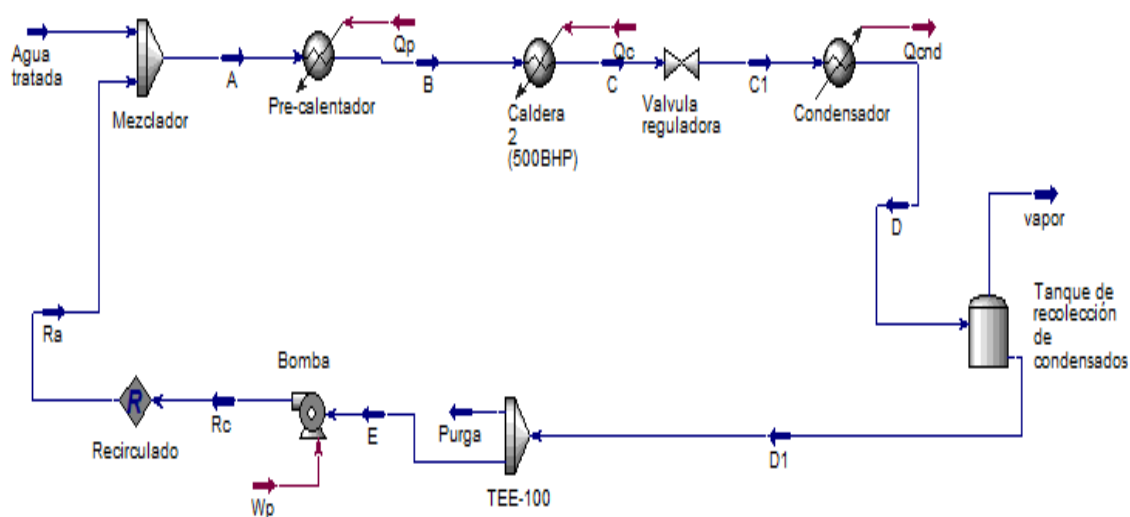


Figura 29. Sistema de generación y distribución de vapor con recuperación de condensado.

Para la simulación en HYSYS fue necesario el uso de un recirculado en el cual se especificó el porcentaje de condensado a recuperar que en este caso es el calculado anteriormente de 80%. El software calcula la cantidad de calor requerida en cada equipo, así como la presión, temperatura y flujo de las líneas.

En la figura 30 se observan los resultados obtenidos en HYSYS, se debe tener en cuenta que en las líneas el calor es negativo debido a que es consumido.

Material Streams														
		Agua tratada	A	B	C	C1	D	D1	vapor	E	Purga	Rc	Ra	
Vapour Fraction		0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Temperature	C	30,00	58,85	78,85	162,2	145,6	70,00	70,02	70,02	70,02	70,02	70,03	70,03	70,03
Pressure	psia	14,69	14,69	14,69	94,69	29,69	29,69	14,69	14,69	14,69	14,69	29,69	29,69	29,69
Molar Flow	kgmole/h	150,0	535,8	535,8	535,8	535,8	535,8	535,8	0,0000	385,8	150,0	385,8	385,8	385,8
Mass Flow	kg/h	2703	9653	9653	9653	9653	9653	9653	0,0000	6950	2703	6950	6950	6950
Liquid Volume Flow	m3/h	2,708	9,673	9,673	9,673	9,673	9,673	9,673	0,0000	6,964	2,708	6,964	6,964	6,964
Heat Flow	kJ/h	-4,271e+007	-1,514e+008	-1,505e+008	-1,271e+008	-1,271e+008	-1,509e+008	-1,509e+008	0,0000	-1,086e+008	-4,225e+007	-1,086e+008	-1,086e+008	-1,086e+008

Energy Streams					
		Qp	Qc	Qcnd	Wp
Heat Flow	kJ/h	8,090e+005	2,345e+007	2,381e+007	980,6

Figura 30. Resultados HYSYS

Con base en los datos ingresados como variables iniciales (flujo de agua para alimentación a la caldera) se obtienen los resultados para las variables de presión y temperatura expuestos en la figura 30.

Los valores resultantes de la simulación son similares a los que se encuentran en la operación actual, por tanto se concluye que es viable la recuperación de condensados.

1.1.2. Steam System Modeler Tool (SSMT)

Steam System Modeler Tool (SSMT) es un software online de libre uso desarrollado por el **U.S. Department of Energy** en el cual ingresando los datos presentados en la figura 31, se obtiene el diagrama base mostrado en la figura 32 en el cual se observa el sistema de generación y distribución de vapor actual de la planta de emulsión sin recuperación de condensado.

Steam Modeler

[Overview](#)
[Base Model](#)
[Create Adjusted Model](#)
[CLEAR MODEL](#)

Boiler Details

Boiler Combustion Efficiency*	<input type="text" value="89"/> %
Fuel Type*	<input type="text" value="Natural Gas"/>
Blowdown Rate*	<input type="text" value="6.7"/> %
Is the blowdown flashed?*	<input type="text" value="No"/>
Preheat Make-Up Water with Blowdown*	<input type="text" value="No"/>
Steam Temperature*	<input type="text" value="167.3"/> °C
Deaerator Vent Rate*	<input type="text" value="0"/> %
Deaerator Pressure*	<input type="text" value="0"/> barg

General Details

Site Power Import*	<input type="text" value="2000"/> kW
Electricity Unit Cost*	<input type="text" value="0.05"/> \$ / kWh
Yearly Operating Hours*	<input type="text" value="8760"/> hrs
Make-Up Water Unit Cost*	<input type="text" value="48.1728"/> \$ / l
Make-Up Water Temperature*	<input type="text" value="30"/> °C
Fuel Unit Cost*	<input type="text" value="0.007"/> \$ / Nm ³

Header Details

Number of Headers	<input type="text" value="2 - Header"/>
-------------------	---

HEADERS	HP	LP	
Pressure*	<input type="text" value="6.4"/>	<input type="text" value="1"/>	barg
Process Steam Usage*	<input type="text" value="0.4"/>	<input type="text" value="7.4"/>	t/hr
Condensate Recovery*	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	%
Flash Condensate into Header		<input type="text" value="No"/>	
Condensate Return Temperature*	<input type="text" value="80"/>	°C	
Flash Condensate Return*	<input type="text" value="No"/>		
Heat Loss*	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	%

Desuperheat Steam into LP*	<input type="text" value="No"/>	<input type="text" value="120"/> °C
----------------------------	---------------------------------	-------------------------------------

Figura 31. Datos del modelo base sin recuperación de condensado.

A su vez el programa permite modelar el sistema de generación y distribución con ajustes como introducir la recuperación de condensad. Para el caso de estudio se ajustó con una recuperación de condensados del 80% que fue la establecida previamente. En la figura 34 se muestra el sistema ajustado para recuperar condensados.

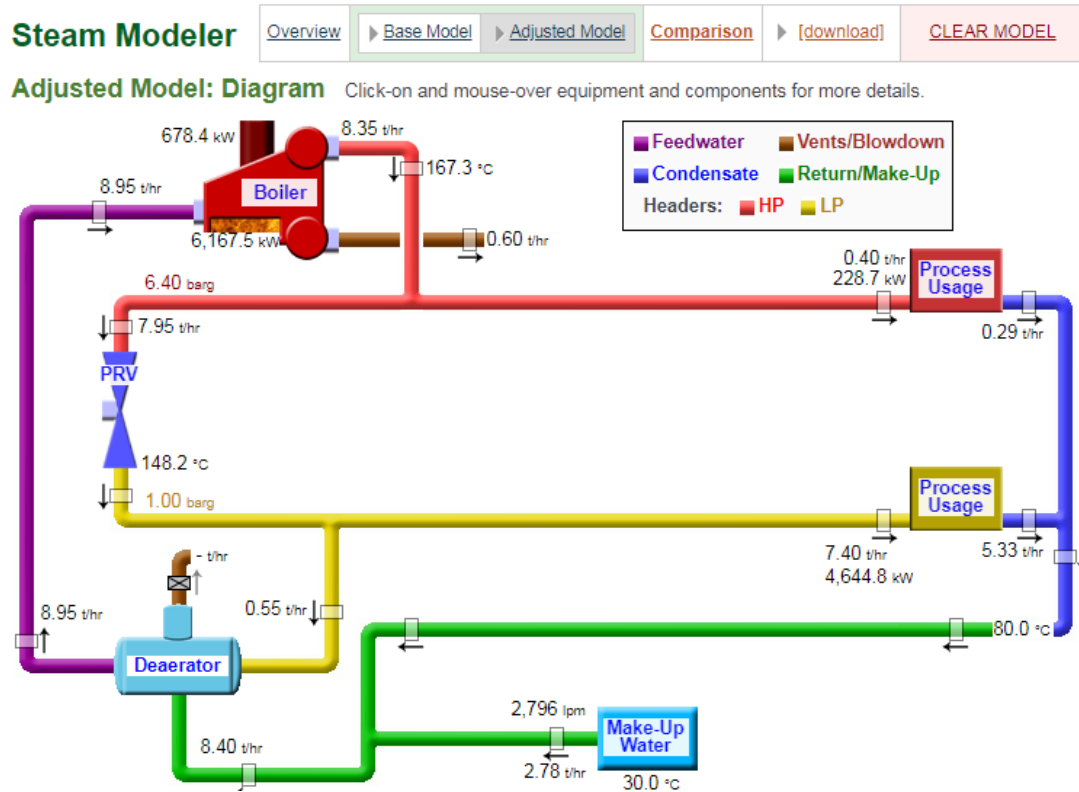


Figura 34. Sistema de generación con recuperación de condensado.

El software permite descargar un archivo de Excel donde muestra los datos suministrados al programa y a su vez una tabla comparativa entre el modelo base: sin recuperación de condensado y el ajustado con recuperación de condensado.

En la tabla 7 se muestran en verde los porcentajes de reducción en parámetros como costo de combustible, el agua de make up (que es el agua directamente captada de la red de agua potable) y emisiones de dióxido de carbono.

Tabla 6. Comparación obtenida por el software.

Base Model vs. Adjusted Model

Cost Summary	Base Model	Adjusted Model	Reduction	
	\$'000s/yr	\$'000s/yr	\$'000s/yr	
Power Cost	\$ 876	\$ 876	\$ 0	0.0 %
Fuel Cost	\$ 36	\$ 34	-\$ 2	-5.7 %
Make-Up Water Cost	\$ 3,575,409	\$ 1,179,762	-\$ 2,395,648	-67.0 %
Total Cost	\$ 3,576,321	\$ 1,180,671	-\$ 2,395,650	-67.0 %

Utility Balance	Base Model	Adjusted Model	Reduction	Units
Power Generation	0	0		kW
Power Import	2,000	2,000	0	0.0 % kW
Total Site Demand	2,000	2,000		kW
Boiler Fuel	6,540.83	6,167.49	-373.34	-5.7 % kW
Fuel Type	Natural Gas	Natural Gas		
CO2 Emissions	10,373.65	9,781.54	-592.11	-5.7 % Tons
Boiler Steam	8.85	8.35	-0.51	-5.7 % t/hr
Make Up Water	8,435.82	2,783.53	-5,652.29	-67.0 % L

Se observa que recuperando el 80% del condensado se obtiene una reducción del 67% en el consumo de agua potable y así mismo en el costo de la energía producida por el gas y una reducción de 592,11 toneladas CO₂. Además, un ahorro del 5.7% en el consumo de combustible (gas natural).

1.2. Ahorros asociados a la recuperación de condensado.

Por medio de la reutilización de los condensados se reducirán los costos asociados al consumo de agua potable, químicos utilizados en su tratamiento antes de ser enviada a la caldera (EXRO 887 FT y SODA CAUSTICA) y consumo de gas natural. En la tabla 7 se muestran los cálculos de los ahorros estimados.

Tabla 7. Ahorros asociados por recuperación de condensados.

Insumo	Unidad	Consumo promedio	Año	Costo Unitario (USD)	Costo mensual (USD)	Costo anual (USD)	Ahorro anual (USD)
Sal Refinada	Bulto	27.90	2017	\$ 7.14	\$ 199.21	\$ 2,390.47	\$ 1,721.14
EXRO 887 FT	Tambor	6.28	2017	\$ 355.55	\$ 2,232.85	\$ 26,794.25	\$ 19,291.86
Agua potable	M3	1000	2017	\$ 1.12	\$ 1,120.00	\$ 13,440.00	\$ 9,676.80
Gas natural	M3	50000	2017	\$ 0.54	\$ 27,207.00	\$ 326,484.00	\$ 81,621.00
					TOTAL ANUAL	\$ 369,108.72	\$ 112,310.80

Se estima un ahorro del 80% en los insumos del proceso de generación de vapor ya que este será el porcentaje establecido para la recuperación de condensado. Se observa un ahorro de US \$ 112.310 al implementar el sistema de recuperación de condensados.

2. Impacto ambiental

En este punto se expresa la mitigación del impacto ambiental del proceso de generación y distribución de vapor que se obtendrían al recuperar condensados en la planta de emulsión, en términos de agua potable y emisiones de dióxido de carbono.

2.1. Agua potable.

Se reducirá el consumo de agua potable de 1000 m³ mensualmente a aproximadamente 600 m³/ mes lo cual conlleva a una cantidad de agua que dejará de ser captada para el proceso de producción de vapor de la planta de emulsión.

2.2. Emisiones de CO₂

El CO₂ es el más conocido de los gases de efecto invernadero, que son aquellos que se consideran los principales causantes del calentamiento global. Los países negocian sobre cuánto deben dejar de emitir, en algunos sitios el etiquetado avisa ya al consumidor de lo que se genera en la fabricación de distintos productos y en los mercados financieros se paga esta la tonelada a unos 14,5 euros.

El peso molecular del dióxido de carbono es de **44 gramos** por mol. En una tonelada de CO₂ hay 22.727 moles y un mol de un gas ideal es igual a 22,4 litros. Entonces, una tonelada de CO₂ ocupará unos 510 m³. (Alvarez, 2018)

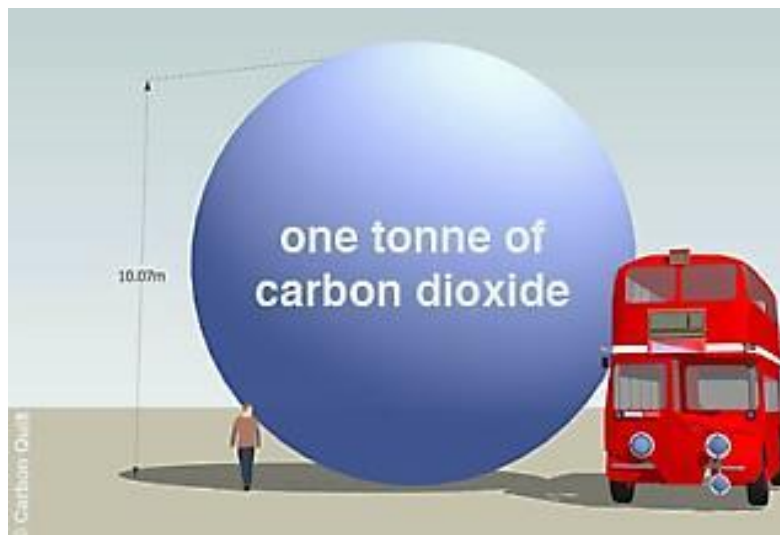


Figura 35. Emisiones de Dióxido de carbono.

Una tonelada de Dióxido de Carbono es como una esfera de mayor tamaño que uno de los autobuses de dos pisos de Londres como lo muestra la figura. El CO₂ también se utiliza como medida de referencia para el conjunto de gases de efecto invernadero generados por el ser humano (GEI), para lo que cada uno de estos gases es convertido a CO₂ equivalente (CO₂ eq).

Si bien el proyecto no generará ahorros económicos debido a que en Colombia aún no se generan multas por las elevadas emisiones de Dióxido de Carbono se mitigará el impacto ambiental que actualmente se está causando.

CAPITULO V. EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA.

En este capítulo se realiza la evaluación de la viabilidad financiera del proyecto partiendo de la selección de los proveedores por medio de una evaluación técnica de acuerdo a los lineamientos de la empresa. Posteriormente se muestra una evaluación financiera con base a una de las ofertas presentada.

1. Etapa 5. Evaluación técnica y financiera.

Los documentos requeridos son el Análisis de riesgos y la evaluación técnica. Así mismo se realiza la evaluación financiera para una de las ofertas.

Una de las etapas primordiales se relaciona con la documentación del alcance y las condiciones comerciales, en la cual se realiza un análisis de riesgos donde se identifican las fuentes de peligro de las actividades a realizar en el servicio y así mismo las estrategias de control para la ejecución de la tarea de una manera segura. En la tabla 8 se muestra un resumen del análisis de riesgo desarrollado con ayuda del supervisor y la ingeniera química de la planta.

Tabla 8. Análisis de riesgos.

No.	FASE / TAREA / EQUIPO / AREA	EVENTO	CAUSAS	ESTRATEGIA DE CONTROLES
1	Inspección del sistema de generación y distribución de vapor	Contacto con superficies o sustancias calientes durante inspección	Superficies calientes, tuberías, mangueras y otros accesorios en las áreas de proceso.	Demarcación de superficies calientes
				Aislamientos de tuberías/superficies caliente
				Áreas restringidas con cadena y demarcación
				Uso de EPP
				Conocimiento del área
				Mantener la mirada en el camino
				Puentes peatonales área de tanques
				Coordinación de tareas simultaneas.

2	Inspección edificio de emulsión	Atropellamiento por camiones de emulsión en calibración dentro edificio de emulsión	Circulación de camiones de emulsión a calibración, uso de sustancias químicas en el área.	Aislamientos del área para impedir el paso de los camiones si la labor implica estar en la línea de fuego donde circula el camión.
				Coordinación de tareas simultaneas.
				Disco de ruptura sistema shut down del módulo operativo y revisado.
				Uso de EPP
				Conocimiento de sustancias químicas utilizadas.
				Sistema de apagado automático módulo
3	Inspección tanques de solución oxidante.	Exposición a sustancias químicas	Transporte de materias primas y sustancias en el área de inspección	Bloqueos con etiqueta y candado en áreas eléctricas.
				Bloqueos con etiqueta y candado en líneas de vapor de tanques en los que se estén trabajando.
				Evaluación de riesgos
				Coordinación de tareas con los operadores de bachada y del módulo.
				Uso de EPP.
				Conocimiento del área.
4	Inspección en el Edificio de Calderas	Detonación de calderas	Sobrepresión no controlada por falla de llama o bajo nivel de agua en una caldera.	Sistema de alarma y parada por fuga de gas operativa.
				Sistema de alarma y parada por bajo nivel de agua operativa.
				Válvulas de alivio (de seguridad) operativas y certificadas.
				Sistema de alarma y parada por falla de llama.

				Calibración, certificación de manómetros o equipos de medición (Metrología).
				Documentos de chequeo actualizados
				Uso de los EPP.
				Bloqueos de etiqueta y candado de los equipos utilizados.
				Coordinación con responsables de tareas simultaneas.
				Demarcación de superficies calientes

1.1. Evaluación técnica de la oferta.

Luego del análisis de riesgos se procede a realizar la evaluación técnica de la oferta, con el formato que se muestra a continuación, especificando puntaje máximo y mínimo aceptable para cada ítem. Posteriormente, se redacta el Anexo A. cuyo objetivo es especificar el alcance de los servicios que prestará el contratista u oferente.

Tabla 9. Evaluación técnica de oferta.

EVALUACIÓN TÉCNICA DE OFERTA			
INGENIERIA DETALLADA DE UN SISTEMA DE RECUPERACION DE CONDENSADOS EN PLANTA EMULSIÓN			
33.9%	PUNTOS A EVALUAR	Puntaje máximo	Mínimo aceptable
	ESTRATEGIA PARA LA EJECUCIÓN DEL SERVICIO		
A.OPERACIÓN			
	- Cronograma a implementar y tiempo mínimo para el proceso de movilización de acuerdo con los requerimientos del SERVICIO (Detallado p=10, General p=6, Elemental p=3; No=0)	10	6
	- Metodología aplicada para la prestación del SERVICIO (Detallada p=5, General p=3, Básica p=1; No=0) (Su metodología es viable técnicamente p=5)	5	3

	- Personal asignado a la ejecución de los SERVICIOS indicados por CERREJÓN. Presenta un cuadro de posiciones y número de personas por posición que son necesarios para la prestación de los Servicios, COMPETENCIAS Y EXPERIENCIA (Personal altamente calificado y experimentado p=20, Personal calificado p=10; NO evidencia experiencia o calificación del personal=0)	20	10
	- El oferente presenta ideas innovadoras o tecnologías que favorezcan la prestación del servicio (Con relación a la seguridad, p=4; con relación al tiempo en su ejecución, p=3; no presenta, p=0).	4	3
	B. CONTROL DE CALIDAD DE LOS SERVICIOS		
	- Incluye formatos específicos para la presentación de informes (Detallado=3, General=1, No= 0)	3	1
	42	33.9%	18.5%
3.2%	POLÍTICAS DEL OFERENTE		
	- Presentó sus políticas propias, homologó o adoptó las políticas de Cerrejón. (Cumple, p=4; No Cumple, p=0).	4	4
	4	3.2%	3.2%
32.3%	ESTRUCTURA DE LA EMPRESA Y HOJAS DE VIDA		
	-Los Ingenieros cumplen con los requisitos del perfil solicitado (Especialista en Vapor/Eficiencia energética). Multiplicar puntaje por el número de ingenieros que cumplen cada criterio dividido entre el número total de ingenieros de la oferta. (Completamente = 20, parcialmente = 10, ninguno cumple el perfil = 0)	20	10
	- Los Ingenieros acreditan experiencia en proyectos similares Multiplicar puntaje por el número de ingenieros que cumplen cada criterio dividido entre el número total de ingenieros de la oferta. (Gran industria=20; Mediana/Pequeña industria=10; No relaciona experiencia p=2).	20	10
	40	32.3%	16.1%
12.9%	RESUMEN DE CONTRATOS EJECUTADOS Y EN EJECUCIÓN		
	- Resumen de contratos ejecutados y en ejecución: Empresas servidas, servicios prestados, personas utilizadas, duración, localización, valor del contrato (Detallado p=4; General p=2; No presenta=0) (Adicionales: Experiencia con empresas reconocidas del sector minero = 4. La experiencia debe ser aplicable y pertinente a lo que se requiere en Cerrejón, por cada proyecto)	16	10

	16	12.9%	8.1%
17.7%	ANEXO A		
	- La metodología para la prestación de los Servicios contempla aspectos claves como los requerimientos técnicos del personal que desarrollará los SERVICIOS. (Si p=20; No=0)	20	20
	- Demuestra disposición y estructura para operacionalizar los indicadores en la prestación de los SERVICIOS. (Si p=2; No=0)	2	2
	22	17.7%	17.7%
PUNTOS TOTALES	124	100%	64%
100%			

Finalmente, se procede a empezar el flujo de aprobaciones de los documentos mencionados anteriormente, los cuales son revisados por un analista de seguridad, un analista financiero, el superintendente, el gerente y el vicepresidente del área.

1.2. Evaluación financiera del proyecto.

En esta sección se hará la evaluación de la inversión a la propuesta escogida considerando una tasa del 12% a un periodo de 5 años (que es el tiempo estipulado de vida útil para este tipo de sistemas), estimando un costo de mantenimiento anual correspondiente al 10% del costo del sistema y teniendo en cuenta otros parámetros como inflación y devaluación.

Con base a una oferta recibida de los tres oferentes en donde cotiza el sistema instalado por un valor de USD\$75K, y considerando un IVA del 19% y una contingencia del proyecto del 10%, tendríamos una inversión de **USD\$100K**.

A continuación, calcularemos el VPN de la inversión y la TIR utilizando la herramienta establecida para evaluaciones financieras (MODEC).

Modec es una herramienta diseñada para evaluar una propuesta de inversión contra una alternativa. La comparación se realiza entre la propuesta que generalmente es un proyecto idea o iniciativa nueva y la alternativa suele ser la situación actual antes de la inversión u otra opción. Por ejemplo cuando se requiere renovar un equipo se puede comparar propuesta de comprar el equipo contra la alternativa de reparar los equipos actuales o contra la compra de la

máquina de una marca diferente. El programa requiere como input: los valores de inversión y asumir los costos asociados a esa inversión (costos de mantenimiento, operación u otros).

Para este caso se llevó a cabo la comparación entre realizar la inversión instalando el sistema (Incluye costos de mantenimiento) contra la situación actual antes de realizar la inversión.

Otras medidas tenidos en cuenta por la herramienta son: la vida útil del sistema, depreciación y proyecciones en el tiempo teniendo en cuenta parámetros económicos (Tasa de cambio, Inflación nacional e intencional si la inversión es dólares, IVA) que son alimentados por el área financiera de la organización. La evaluación financiera realizada con la herramienta MODEC se muestra en la figura 36.

MODEC-2005.XLS							
10-May-18		PERIODO	0	1	2	3	4
09:23 AM		AÑOS	2018	2019	2020	2021	2022
INFLACION FIN DE PERIODO (Col\$)		P	5.75%	4.16%	3.53%	3.42%	3.56%
DEVALUACION FIN DE PERIODO (Col\$)		A	-2.46%	-4.31%	-2.22%	0.62%	0.00%
INFLACION FIN DE PERIODO (US\$)		R	2.00%	2.30%	2.10%	2.50%	2.10%
TASA DE CAMBIO PROMEDIO (Col\$/US\$)		A	\$2,958	\$3,014	\$2,978	\$2,994	\$3,085
TASA DE CAMBIO FIN DE PERIODO (Col\$/US\$)		M	\$3,030	\$2,998	\$2,960	\$3,028	\$3,141
INFLACION ACUMULADA (Col\$)		E	1.000	1.042	1.078	1.115	1.155
DEVALUACION ACUMULADA (Col\$)		T	1.000	0.957	0.936	0.942	0.942
INFLACION ACUMULADA (US\$)		R	1.000	1.023	1.044	1.071	1.093
GAP ACUMULADO		O	1.000	1.088	1.152	1.184	1.227
IMPUESTO DE RENTA (%)		S	40.0%	37.0%	33.0%	33.0%	33.0%
MODEC-2005.XLS							
TOTAL INVERSIONES		R	100,000	0	0	0	0
TOTAL INGRESOS EN US\$ CORRIENTES		E	0	0	0	0	0
TOTAL GASTOS EN US\$ CORRIENTES		S	0	-121,367	-128,498	-132,069	-136,771
RENTA BRUTA (INGRESOS - COSTOS)		U	0	121,367	128,498	132,069	136,771
TOTAL DEPRECIACIÓN		L	0	20,000	20,000	20,000	20,000
RENTA GRAVABLE		T	0	101,367	108,498	112,069	116,771
IMPUESTOS		A	0	37,506	35,804	36,983	38,534
INGRESOS DESPUÉS DE IMPUESTOS		D	0	83,861	92,694	95,087	98,237
DELTA CAPITAL DE TRABAJO - DÓLARES CORRIENTES		O	0	0	0	0	0
FLUJO DE CAJA NETO:			-100,000	83,861	92,694	95,087	98,237
DESCUENTO:			0%	5%	10%	12%	13%
V.P.N.:		10	370,612	305,830	253,929	236,042	227,631
T.I.R.:		85.43%	T. Ensayo 30%				

Figura 36. Evaluación financiera con el software MODEC.

El resultado muestra que con los parámetros definidos para la inversión el programa arroja un VPN de USD\$236K y una TIR de 85.43%, lo que valida que es una inversión muy rentable.

Además, se realizó una sensibilización financiera para determinar a partir de qué valor la inversión no se considera rentable y se obtuvo que el valor de la inversión debe estar por debajo de los USD \$400K.

Ante una expectativa de mayor porcentaje de recuperación de condensado, por las características del sistema de generación y distribución de vapor en la planta (Corrosión por sustancias químicas en el ambiente), el cual tiene una probabilidad moderada de presentar fugas y/o contaminación del condensado, se requerirían implementar una serie de actividades/equipos (Mantenimiento y reemplazo de componentes con mayor frecuencia, mayor número de paradas de planta, entre otras) que ameritarían mayores inversiones a las consideradas en este análisis. En todo caso un análisis detallado de esta opción podría considerarse en un estudio posterior.

CAPITULO VI. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN.

En este capítulo se proponen recomendaciones para lograr una mayor eficiencia del sistema de generación y distribución de vapor con miras a que el funcionamiento del sistema de recuperación de condensados a implementar sea el adecuado. Además, se presenta el plan de implementación del sistema propuesto.

1. *Etapas 6: Recomendaciones y plan de implementación.*

En esta etapa se exponen las observaciones y recomendaciones realizadas por expertos en eficiencia energética con el fin de obtener un resultado en la implementación y operación del sistema óptimo.

1.1. Observaciones

Generación de vapor:

- a) Se observa que las calderas existentes tienen una presión máxima de trabajo de 150 psig, sin embargo, trabajan a 80 psig. Esto aumenta la posibilidad de arrastre de agua condensada en el vapor.
- b) La caldera número 2 cuenta con una tecnología más eficiente de operación, al controlar la relación aire combustible mediante un sistema de actuadores independientes programables electrónicamente en sus valores óptimos.
- c) La caldera número 1 cuenta con un solo actuador para regular la relación aire combustible y su mecanismo de control es mecánico (varillaje) con precisión limitada de regulación. Es importante mantener la relación aire combustible ya que por cada 1% de O₂ en gases de combustión por encima del vapor óptimo la eficiencia de la caldera disminuye en 0,66%.
- d) El aislamiento térmico de las calderas es bueno.
- e) El régimen de purgas de las tres calderas es manual. Considerando que en la actualidad no se recupera condensado y toda el agua de alimentación de calderas es tratada, para mantener la concentración de sólidos disueltos en agua de calderas se requiera de un alto nivel de purgas, lo que impacta significativamente la eficiencia de las calderas.
- f) La temperatura del agua de alimentación se mantiene en 60°C. Este valor de temperatura es bajo debido a que no se recupera el calor del condensado y se usa vapor vivo de la caldera para precalentar el agua

tratada de alimentación a la caldera. El uso de vapor vivo para precalentamiento del agua de alimentar es necesario para evitar choque térmico y bajadas bruscas de presión en la caldera pero es muy ineficiente ya que se está calentando agua a costa de bajar la eficiencia de la caldera.

La temperatura adecuada del agua de alimentación de caldera debería ser cercana a los 80-90°C, según datos de diseño de estas calderas. Por cada 6°C que se reduzca la temperatura de este valor el incremento del consumo de combustible es del 1%.

- g) La llama de combustión de la caldera numero 2 debe ser ajustada en la relación aire combustible por posible exceso de aire.
- h) No se recupera el calor de la purga de fondo de las calderas. La purga se envía a un tanque y de allí al canal de aguas residuales. El re-vaporizado de esta purga en el tanque puede recuperarse en el tanque de alimentación a las calderas condensado, más aún cuando no se recupera el condensado en la actualidad y se requiere calor para elevar la temperatura del agua de alimentar. Esta medida pudiera tener más efecto con una purga automática debido a que sería de forma más continua la cantidad de re-vaporizado hacia el tanque de condensado.

Tanque de alimentación a las calderas:

- a) El tanque de alimentación a las calderas debe ser aislado y la temperatura externa no debe superar los 50°C, medido en el área donde existe agua en el interior del mismo. Es posible que en la actualidad cumpla esta condición por la baja temperatura del agua pero cuando se recupere condensado o se suba la temperatura del agua en el interior del mismo debe mantenerse.
- b) La tubería de alimentación de vapor vivo de caldera hacia el tanque de condensado no está aislada por lo que está sometida a pérdidas de calor en el transporte de ese vapor.
- c) En la actualidad se usa vapor vivo directo de caldera para precalentar el agua en el tanque de condensado y antes de entrar al tanque se estrangula en una válvula de regulación. NOTA: Es mucho más eficiente usar para este fin vapor de baja presión (15 psig) que tiene una temperatura de 121°C saturado más cercana a la temperatura del agua que queremos entregar a la caldera.

Sistema de distribución del vapor

- a) El sistema de distribución de vapor cuenta con tuberías debidamente aisladas a simple vista, aunque no se midió la temperatura exterior del aislamiento ni su espesor.
- b) La medición del estado real de aislamiento es importante ya que Los sistemas de distribución bien-aislados tendrá típicamente una pérdida de calor del 2-4%, con un aislamiento promedio perderán un 5-8% mientras los sistemas pobremente aislados pueden perder un 10-15% o más. Las pérdidas por aislamiento del sistema de distribución de vapor son pérdidas fijas independientemente del flujo de vapor.
- c) El sistema de distribución también cuenta con una válvula de reducción de presión de 80 psig a 15 psig, para alimentar los usuarios finales de vapor a una temperatura no mayor de 120°C. Es importante destacar que a la válvula reductora debe entrar vapor saturado a 80 psig o cerca de 95 psia y en la válvula sufre un estrangulamiento a entalpía constante. Este proceso de estrangulamiento provoca el sobrecalentamiento del vapor, por lo que sale a una temperatura superior a la de saturación correspondiente a los 15 psig (29,7 psia) y que es de 130°C. Para lograr saturar el vapor a la salida de la válvula reductora se requiere instalar un de-sobrecalentador (atemperador) del vapor que consiste en un equipo que añade agua pulverizada al vapor hasta saturarlo y le baja su temperatura a 120°C.
- d) El sistema de distribución de vapor no cuenta con medidor de la calidad del vapor, lo cual sería necesario teniendo en cuenta que la presión de trabajo de las calderas es 20 psig inferior a la presión de trabajo de las mismas.

Uso final del vapor

- a) El uso final del vapor es fundamentalmente para el calentamiento de soluciones a través de intercambiadores de calor.
- b) Se conoció que en ocasiones se produce contaminación del condensado del vapor usado para calentamiento debido a roturas de las conexiones

de la tubería de vapor o de condensado a entrada o salida de los intercambiadores.

- c) Se observó que la caldera número 2 (única en funcionamiento en el recorrido) trabajó muy poco tiempo con periodos de parada largos. Esto indica que la caldera contaba con una capacidad de generación muy superior a la demanda de vapor del proceso en ese momento. Esta característica produce pérdidas significativas del sistema ya que durante el periodo de parada el calor acumulado en la caldera se disipa por la chimenea y paredes y al caerse la presión y volver a arrancar, la caldera debe volver a entregar todo el calor disipado inútilmente al exterior.
- d) Se observó que podría realizarse un gráfico de demanda horario típico de vapor para el proceso lo cual ayudaría a conciliar el uso de las calderas existentes de acuerdo a la demanda horaria.

Recuperación de condensados

- a) Se inspeccionaron varias trampas con un termómetro láser y se observó un adecuado funcionamiento de las mismas, sin embargo, a simple vista la dimensión de las trampas parece pequeña respecto al flujo manejado por lo que pudiera ser adecuado revisar el dimensionamiento de las mismas.
- b) Las trampas de vapor no se encuentran aisladas y todas las observadas cuentan con filtros de entrada y válvulas de no retorno.
- c) Se midió la temperatura de condensado a la salida de las trampas y se observaron temperaturas entre 70-82°C, lo cual es cercano a la temperatura de saturación a la presión de 15 psig.

Indicadores operacionales del área de calderas

- a) Se registran los datos de consumo de combustible y cantidad de agua usada en el área.
- b) En las calderas se observa medición de la temperatura de agua de alimentación, la presión de salida del vapor, la temperatura de gases en chimenea y la presión de gas natural a la entrada del quemador. También se mide periódicamente la cantidad de sólidos disueltos en el agua de calderas.
- c) La composición de gases de combustión se mide temporalmente cuando se solicita el servicio.

- d) El único indicador del área de calderas es el consumo de gas natural. También se usa como indicador global del proceso la cantidad de producto realizado por unidad de gas natural consumido.

1.2. Recomendaciones.

Con el fin de mejorar la eficiencia del sistema de distribución y generación de vapor y de esta manera asegurar un mejor funcionamiento del sistema de recuperación de condensado a instalar se proponen las siguientes recomendaciones.

1. Realizar un diagnóstico detallado de las calderas donde se pueda medir la eficiencia de las mismas por el método directo e indirecto para evaluar su uso más eficiente de acuerdo a la demanda de vapor.
2. Cuantificar el impacto de uso de vapor a 15 psig en lugar de vapor a 80 psig para precalentar en agua de alimentar en tanque de condensado
3. Evaluar el impacto en la eficiencia de la caldera el uso de un sistema de purgas automático para reducir las pérdidas de calor por este concepto.
4. Medir la calidad de vapor a la salida de calderas para evaluar el impacto de la reducción de la presión de trabajo en la operación de la caldera.
5. Realizar el grafico de demanda horaria típica de vapor del proceso en los diferentes regímenes de producción para reglamentar el uso más eficiente de las calderas disponibles.
6. Evaluar el uso de dämpers automáticos de chimenea para evitar pérdidas de calor ante peradas frecuentes y prolongadas de las calderas.
7. Establecer un sistema de evaluación frecuente de trampas de vapor para corregir su malfuncionamiento cuando este se produzca. (Una trampa de vapor típica pierde 1-2 lb/hr de vapor vivo en operación normal. Una trampa fallando puede perder de 10 a 100 libras por hora de vapor vivo. El reemplazo de trampas puede tener un período de recuperación de 1 año mientras que la reparación de la trampa puede tener un período de recuperación de sólo unos meses.)
8. Revisar la eficiencia de la combustión de la caldera número 2.
9. Aislar la tubería de alimentación de vapor al tanque de condensado.
10. Revisar si la temperatura de vapor sobrecalentado a la salida de la válvula reductora (130°C) es adecuada a los requerimientos del proceso. Verificar esta temperatura midiendo la temperatura de la tubería de vapor

desnuda después de la válvula reductora o a la entrada de los tanques de solución.

11. Establecer registro de operación con los parámetros principales que determina la eficiencia de la generación de vapor (control operacional de la generación de vapor)
12. Evaluar la posibilidad de recuperar el calor del condensado contaminado.
13. Evaluar la posibilidad de recuperar el calor y el agua del condensado no contaminado mediante un sistema que pueda separar en línea el condensado contaminado del no contaminado, en caso que ocurra la contaminación.

1.3. Plan de implementación.

Se propone el siguiente plan de implementación posterior a la adjudicación del contrato para el montaje e instalación del sistema de recuperación de condensados diseñado.

1.3.1. Entrenamiento de operadores.

Realizar entrenamiento teórico-práctico y acompañamiento de una semana a los operadores del laboratorio de la planta de emulsión, en uso y verificación del funcionamiento del sistema de recuperación de condensado dictado por un experto. Este entrenamiento desarrollará los temas relacionados con la detección de fugas de vapor, verificación del correcto funcionamiento de las trampas de vapor y medición de la concentración de nitratos. Se estipulan dos días para cada tema, ocho horas por día y una evaluación al final del entrenamiento que debe ser aprobada con mínimo 70/100.

1.3.2. Rutina de monitoreo del sistema.

Se establece que el operador de laboratorio debe monitorear la calidad del condensado, como lo hace actualmente con el agua de alimentación de las calderas. Además, deberá seguir la siguiente ruta de monitoreo propuesta, teniendo en cuenta que se espera una reducción notable en el consumo de agua y combustible:

1. Consumo de agua potable de alimentación a las calderas. (Representado con una F en la corriente “Water” en la figura 43): Se toma el valor indicado por el contador ubicado en la entrada del edificio de calderas todos los días a las 8:50am.

2. Consumo de combustible (Gas natural): Se toma el valor indicado por el contador de gas todos los días a las 8:50am.
3. Temperatura agua de alimentación a las caleras. (Representado con una T en el conducto de agua en la figura 43): Se verifica en el termómetro ubicado en los tanques de alimentación a las calderas.
4. Flujo de vapor producido: Se recomienda instalar un flujometro en la salida de la caldera.
5. Presión del vapor producido: Verificar en el manómetro de la caldera que este operando.
6. Color de llama: A través del visor ubicado en la caldera. Observar si es azul, amarilla o combinada.

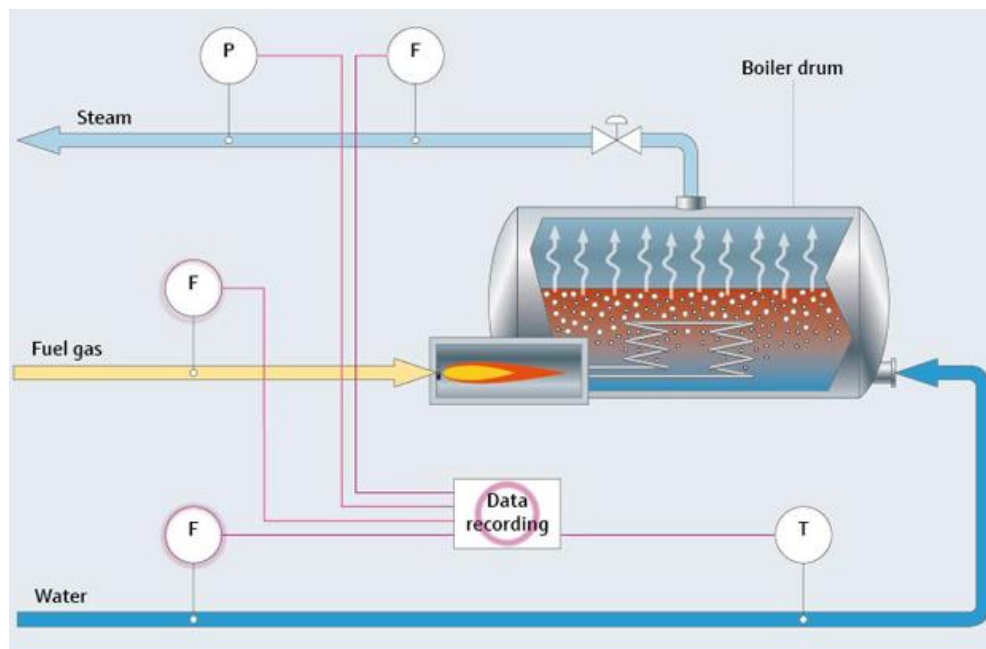


Figura 37. Parámetros a medir en la caldera.

1.3.3. Plan de prueba.

Se propone colocar en funcionamiento por un mes el sistema de recuperación de condensado, periodo en el cual se monitoreará diariamente el consumo de agua potable, consumo de los químicos de tratamiento (EXRO 887 FT y SODA CAUSTICA), el consumo del gas natural y la calidad del condensado, con el fin de evidenciar la eficiencia de la implementación del sistema. Durante el periodo de prueba el operador del laboratorio con el coordinador de la planta tomaran el valor del consumo del contador de agua potable ubicado en la entrada del edificio de calderas a las 8:50am todos los días, posteriormente se realizará la

medición de la concentración de nitratos en la entrada del tanque de recolección de condensados y en la caldera.

1.3.4. Mantenimiento

- Se establece unas revisiones semanales de las tuberías y trampas (Cheques, filtro) instaladas comprobando con el medidor laser de temperatura una diferencia de 10 grados centígrados entre la entrada y salida de la trampa de vapor.
- Se establece una revisión mecánica mensual de la bomba del sistema de recuperación de condensado. Para la bomba de respaldo se recomienda realizar una revisión de acuerdo a lo sugerido por el fabricante.
- Se establece realizar una limpieza interna semestral al tanque de recuperación de condensado.
- Se establece inspeccionar el sensor de conductividad y su respaldo semanal y programar su reemplazo preventivo de acuerdo a recomendación del fabricante.

1.3.5. Plan de contingencia.

Conociendo la importancia de los planes de contingencia teniendo en cuenta que es una herramienta muy valiosa basada en un análisis de riesgo, que nos permitirá ejecutar un conjunto de normas, procedimientos y acciones básicas de respuesta que se deben tomar para afrontar de manera oportuna, adecuada y efectiva una emergencia.

Se expone en la tabla 10 el plan de contingencia desarrollado para el proyecto identificando los tipos de fallas que pueden ocurrir una vez instalado el sistema de recuperación de condensado en la planta de emulsión de Cerrejón y a su vez su medida de contingencia.

Tabla 10. Plan de contingencias.

Tipo de falla	Consecuencias	Acción recomendada
Falla del sistema de monitoreo de la calidad del condensado	Contaminación del condensado en los tanques de solución oxidante	1. Activación del sensor de conductividad de respaldo. 2. Adicionar dosis de EXRO 887FT o Soda Caustica de acuerdo al grado de contaminación para que el agua sea óptima para alimentarla nuevamente a las calderas de acuerdo al grado de contaminación. 3. Enviar agua al drenaje.
	Contaminación del agua en el tanque de alimentación a las calderas	
Insuficiente cantidad de condensado	Poca cantidad de agua en la caldera.	Aumentar el flujo de agua potable directamente de la red.
Daño de la bomba de recuperación de condensado	No hay flujo de agua hacia el tanque de alimentación de la caldera.	Instalar bomba de recuperación de condensado de respaldo.

1.3.6. Cronograma.

A continuación se expone el cronograma propuesto para el plan de implementación del sistema de recuperación de condensados.

Tabla 11.Cronograma de implementación.

Nº	ETAPA	Semanas																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	Socialización del proyecto en la planta de emulsión.																		
2	Movilización del personal a trabajar en el montaje del sistema.																		
3	Obras civiles.																		
4	Entrenamiento del operador de laboratorio.																		
5	Traslado de equipos.																		
6	Montaje del sistema de recuperación de condensado.																		
7	Periodo de prueba.																		
8	Análisis de los resultados del periodo de prueba del sistema.																		
9	Seguimiento al sistema de recuperación de condensado.																		

CONCLUSIONES

- Existe la tecnología para la recuperación de condensado en procesos industriales como el presente en la planta de emulsión.
- Las características de la planta de emulsión permite la implementación de un sistema de recuperación de condensados.
- Se definieron dos diseños compatibles con la planta de emulsión denominadas Tanque-Bomba y Trampa-Bomba respectivamente.
- De los diseños identificados se encontró que el que más se ajusta a los requerimientos de la planta es la propuesta asociada con el sistema Tanque-Bomba.
- A través de los simuladores computarizados como Aspen Hysys y Steam System Modeler Tool se validó la factibilidad de la implementación del sistema de recuperación de condensados en la planta.
- Con la implementación del sistema de recuperación de agua de alta calidad se obtendrá un ahorro del 80% en el consumo del recurso hídrico, una reducción de 634 toneladas de dióxido de carbono y un ahorro en dinero de USD 112.310 anuales respectivamente.
- A través de una sensibilización financiera se determinó que el valor máximo a invertir debe estar por debajo de los USD \$400K para considerarla rentable, asumiendo un VPN del 12% y una TIR de más del 10%. Las propuestas evaluadas en este proyecto cumplen con este requisito.
- Llevando a cabo el plan de implementación incluido en este proyecto se garantiza una puesta en marcha exitosa del sistema de recuperación de condensados en la planta de emulsión.

REFERENCIAS

- ¿Qué es el Condensado?: TLV. *Compañía Especialista en Vapor*. (20 de Septiembre de 2017). Obtenido de TLV. Compañía Especialista en Vapor: <https://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/introduction-to-condensate-recovery.html>
- Alvarez, C. (07 de Mayo de 2018). *ECO-LAB*. Obtenido de <http://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/04/una-tonelada-de-co2.html>
- Arriaga Medina, J. A. (2015). *Séptimo Foro Mundial del Agua y la Red del Agua de la UNAM*. Mexico.
- British Standard: Treatment of water for steam boilers and water. (1997). *Norma BS 2486 : 1997*.
- (2015). *Cada gota cuenta. Informe de sostenibilidad 2015*. Albania: Cerrejón.
- Cengel, Y., & Boles, M. (1976). *Transferencia de calor*. Boston: Mc Graw Hill.
- Concepto de pH. (19 de Septiembre de 2017). Obtenido de Concepto.de: <http://concepto.de/ph/#ixzz4tGee314J>
- Daza, J. A. (2013). *Recuperación de condensados generados en el sistema de drenaje de cabezales de vapor y venas en el área de setil (Servicios auxiliares) de la refinería estatal de Esmeraldas*. Guayaquil.
- EDP University - Recinto de San Sebastian. (17 de Septiembre de 2017). Obtenido de Biblioteca virtual: <http://www.edpcollege.info/ebooks-pdf/cap1.pdf>
- El agua. *Calidad y contaminación*. (20 de Septiembre de 2017). Obtenido de El agua. Calidad y contaminación.: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-calidad-contaminacion-1-2/parametros-quimicos-calidad-aguas-dureza-alcalinidad>
- Garcia, R. (7 de Septiembre de 2017). *Purgadores (Eliminación y recuperación de condensados)*. Obtenido de Ingeniero Marino: <http://ingenieromarino.com/17-purgadores-eliminacion-y-recuperacion-de-condensados/>
- Glosarios especializados . (6 de Septiembre de 2017). Obtenido de Glosarios especializados: <http://glosarios.servidor-alicante.com/mineria/esteril>
- Gómez, J. E. (2014). *Análisis de equipos de desgasificación en instalaciones de vapor*. Sevilla.
- Herranz, M. M. (2009). *Tesis de Máster : Sistema de Recuperación de Condensados de una Línea de Decapado de Bobinas Laminadas en Caliente*. Valencia.
- Lienhard IV, J. (22 de Febrero de 2000). *A Heat Transfer Textbook*. En J. H. Lienhard IV, *A Heat Transfer Textbook*. Obtenido de Curiosoando.: <https://curiosoando.com/conveccion-termica>
- Lopez Maldonado, V. J. (01 de 03 de 2018). Antecedentes de recuperación de condensados en Planta Emulsión. (A. Orozco, Entrevistador)
- Maldonado, V. J. (01 de 03 de 2018). Antecedentes de la recuperación de condensados en Planta Emulsión. (A. Orozco, Entrevistador)

Marroquín, F. J. (Abril de 2013). *Evaluacion del sistema de vapor de una industria de bebidas para la reduccion de las perdidas de condensados*. Guatemala.

Open Course Ware. (6 de Septiembre de 2017). Obtenido de Aprende en linea: <http://aprendeonline.udea.edu.co/lms/ocw/mod/page/view.php?id=255>

Operacion integrada: Cerrejón. (5 de Septiembre de 2017). Obtenido de Cerrejón: <http://www.cerrejon.com/site/nuestra-empresa/operacion-integrada.aspx>

Orozco Roca, A. (10 de Marzo de 2018). Visita técnica. (A. Blanco, Entrevistador)

Planta Prillex® América. (2016). *PROCESOS PRODUCTIVOS*. Mejillones.

Reacción endotérmica: Ecured. (6 de Septiembre de 2017). Obtenido de Ecured: https://www.ecured.cu/Reacción_endotérmica

Rodríguez, M. C. (2017). *Emulsiones*. Bogotá.

Santillan: Vapor. (5 de Octubre de 2017). Obtenido de Santillan: <http://www.santillan.es/web/index.php/es/instalaciones/vapor>

sarco, S. (2012). *Vapor - El Fluido con Energía*.

Spirax Sarco. (2002). Purgador de boya cerrada para vapor FT 14. *Ficha técnica: Purgador de boya cerrada para vapor FT 14*.

Spirax Sarco. (6 de Septiembre de 2017). *Tecnologías para la recuperación de condensado en sistemas industriales de vapor*. Cali. Obtenido de Spirax Sarco: www.spiraxsarco.com

Spirax Sarco. (10 de Marzo de 2018). *Spirax Sarco*. Obtenido de Spirax Sarco: http://www2.spiraxsarco.com/esc/SS_Properties.aspx?country_id=ar&lang_id=arg

Spirax Sarco. (s.f.). Guia de referencia técnica: Calderas y accesorios.

Teoria del Vapor: TLV. (6 de Septiembre de 2017). Obtenido de TLV: <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/what-is-steam.html>